

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL  
SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA CLINICA  
PRIVADA DE ALTA COMPLEJIDAD UBICADA EN LA  
CIUDAD DE BARRANQUILLA**

**ING. JULIO CESAR EFRO BOBADILLA**



**UNIVERSIDAD DEL COSTA – CUC  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
BARRANQUILLA,  
COLOMBIA  
2019**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL  
SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO EN UNA CLINICA  
PRIVADA DE ALTA COMPLEJIDAD UBICADA EN LA  
CIUDAD DE BARRANQUILLA**

**ING. JULIO CESAR EFRO BOBADILLA**

**Trabajo de Grado presentado para optar al título de  
Magíster en Ingeniería con énfasis en Ingeniería  
Industrial**

**TUTOR: PhD. HERNÁN HERNANDEZ HERRERA  
CO-TUTOR: MSC. JOHAN MARDINI BOVEA**

**UNIVERSIDAD DEL COSTA – CUC  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
BARRANQUILLA,  
COLOMBIA  
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

JURADO

---

JURADO

---

---

Barranquilla, 30 de agosto de 2019

### **Agradecimientos**

Mi infinito agradecimiento a Dios por haberme dado la vida, sabiduría, entendimiento, conocimiento y fortaleza para poder culminar de manera satisfactoria todas las metas trazadas en el desarrollo del proyecto y permitirme haber llegado hasta este momento de mi formación profesional.

Doy gracias a mis tutores PhD. Hernán Hernández Herrera y Msc. Johan Mardini Bovea, por su paciencia, dedicación, motivación y criterio. Gracias porque ustedes fueron protagonistas de esta etapa de mi vida, gracias por tener siempre esa disposición por enseñarme y guiarme.

Especial agradecimiento a mi familia por soportar en muchas ocasiones mi ausencia, a mis padres Julio Efro y Marlene Bobadilla, por ese gran amor que tienen hacia mí, quienes con sus sabios consejos, firmes valores y su gran apoyo incondicional que me han brindado en todo momento, supieron motivarme hasta alcanzar la meta trazada, a mis hermanas Arlem y Yuliana por estar siempre pendientes de mí, darme ánimo, apoyarme de forma incondicional, escucharme y alentarme, a mi esposa Fauz Maloof por ser la mejor compañera del mundo, por creer siempre en mí, por darme fortaleza, por estar siempre conmigo en las situaciones más difíciles dándome aliento para continuar a pesar de las dificultades, a mi hija Nashwa que es el centro de mi vida y una de las razones de seguir adelante para brindarle un mejor futuro.

Agradecimiento a mi amigo y socio Rogelio Ortega por su aporte y guía en el desarrollo de la presente obra.

A todas las personas que me han permitido ser un amigo, los que me acompañaron durante la carrera brindándome su amistad y todos los amigos que me han acompañado durante el recorrido de mi vida que de alguna forma me han apoyado.

### **Resumen**

La Gestión Energética representa un renglón importante dentro de la Gestión empresarial, al ser la Energía un servicio o insumo imprescindible para la producción de bienes o la prestación de servicios. El proyecto evaluación de la eficiencia energética del sistema de aire comprimido que es el componente principal de la planta de producción de oxígeno medicinal de la clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de barranquilla se completó con el objetivo de disminuir el consumo energético que representa este sistema para esta empresa del sector de la salud. En este estudio se determinó la eficiencia del sistema de aire comprimido en la generación, almacenamiento y transporte, así como, su grado de utilización en las diferentes áreas, reutilización del calor y humedad.

*Palabras clave: Gestión energética, aire comprimido, oxígeno medicinal, ahorro energético.*

**Abstract**

Energy Management represents an important line within Business Management, as Energy is a service or essential input for the production of goods or the provision of services. The project evaluation of the energy efficiency of the compressed air system that is the main component of the medicinal oxygen production plant of the high complexity private clinic located in the city of Barranquilla was completed with the aim of reducing the energy consumption that represents this system for this company in the health sector. In this study, the efficiency of the compressed air system in generation, storage and transport was determined, as well as its degree of use in the different areas, reuse of heat and humidity.

*Keywords: Energy management, compressed air, medicinal oxygen, energy saving.*

## Contenido

Lista de Tablas y Figuras .....	9
Capítulo 1 Descripción del proyecto.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Planteamiento del Problema. ....	13
1.3. Justificación. ....	15
1.4. Objetivos.....	17
1.4.1. Objetivo general. ....	17
1.4.2. Objetivos específicos. ....	17
1.5. Metodología.....	17
1.5.1. Recopilación de información. ....	17
1.5.2. Análisis de la información. ....	18
1.5.3. Alcances y limitaciones. ....	18
Capítulo 2 Revisión de la literatura.....	21
2.1. Introducción a los Sistemas de aire comprimido.....	21
2.2. Generalidades del aire comprimido. ....	23
2.3. Aire comprimido en clínicas medicinales. ....	24
2.4. Componentes principales de un sistema de aire comprimido.....	26
2.4.1. Compresores.....	26
2.4.2. Secado del aire comprimido.....	41
2.4.3. Filtros. ....	48
2.4.4. Depósitos de aire comprimido. ....	51
2.5. El Sistema de aire comprimido en la producción de oxígeno medicinal.....	52
2.5.1. Producción de Oxígeno mediante el Sistema Criogénico .....	53
2.5.2. Producción de Oxígeno mediante un Sistema PSA .....	55
2.6. Consumo de energía. ....	58
2.7. Eficiencia Energética. ....	59
2.8. Auditoría energética .....	60
2.9. Gestión energética. ....	60
2.10. Norma INTE/ISO 50001:2011 .....	63

2.11. Sistema de la Gestión de la Energía y requisitos.....	65
2.12. Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido. ....	67
2.13. La auditoría energética en los sistemas de aire comprimido. ....	69
Capítulo 3 Implementación de la metodología y análisis de los resultados.....	72
3.1. Descripción de la instalación.....	72
3.2. Tecnología utilizada. ....	73
3.2.1. Monitores de electricidad Eyedro. ....	73
3.2.2. Pinza amperimétrica.....	74
3.3. Análisis de los equipos que conforman el sistema de aire comprimido.....	75
3.4. Evaluación de los costes de energía. ....	81
3.5. Propuesta de mejora para oportunidades de ahorro.....	89
3.5.1. Recuperación de calor del sistema. ....	89
3.5.2. Reutilizar el condensado generado. ....	91
3.6. Conclusiones.....	93
3.7. Recomendaciones. ....	93
Referencias .....	95
Anexos .....	107



## Lista de Tablas y Figuras

### Tablas

Tabla 1.1 Matriz de actividades .....	19
Tabla 3.2 Especificaciones de los monitores de electricidad Wireless.....	74
Tabla 3.3 Especificaciones de la pinza amperimétrica modelo PM2016A. ....	75
Tabla 3.4 Principales equipos de generación de aire comprimido y oxígeno.....	77
Tabla 3.5 Características de diseño de los compresores .....	79
Tabla 3.6 Especificaciones técnicas de los filtros.....	80
Tabla 3.7 Especificaciones técnicas de los filtros.....	80
Tabla 3.8 Consumo de energía, tarifas y costo de la energía compresores1 - 3 .....	83
Tabla 3.9 Consumo de energía, tarifas y costo de la energía compresores 2 - 4 .....	83
Tabla 3.10 Costes de la producción de aire comprimido y oxígeno .....	86
Tabla 3.11 Operación de los generadores en horas y producción de oxígeno .....	86
Tabla 3.12 Ahorros por reutilización del calor .....	91
Tabla 3.13 Cálculos para los ahorros de CO2 con la implementación de la recomendación .....	91
Tabla 3.14 Ahorros por reutilizar el condensado.....	92

### Figuras

Figura 2.1. Ejemplo de sistema.....	22
Figura 2.2. Compresión del aire atmosférico.....	23
Figura 2.3. Liberación de calor y humedad en la conversión de aire comprimido.....	24
Figura 2.4. Figura 2.4. SAC y elementos.....	26
Figura 2.5. Tipos de compresores más comunes .....	29
Figura 2.6. Compresor de pistón.....	30
Figura 2.7. Figura 2.7. Compresor de pistón de laberinto sellado .....	31
Figura 2.8. Compresor de diafragma mecánico .....	32
Figura 2.9. Compresión en un compresor de tornillo .....	33

Figura 2.10. Diagrama de flujo de un compresor de tornillo exento de aceite .....	34
Figura 2.11. Diagrama de flujo de un compresor de tornillo con inyección de aceite .....	35
Figura 2.12. Estructura de un compresor scroll .....	36
Figura 2.13. Esquema de un compresor de paleta Mattei .....	37
Figura 2.14. Soplante Roots SM impulsor único de una etapa .....	38
Figura 2.15. Compresor centrífugo de aire Centac C1000. ....	40
Figura 2.16. Compresor axial.....	41
Figura 2.17. Los problemas debido a la precipitación de agua en las tuberías .....	42
Figura 2.18. Relación entre punto de rocío y punto de rocío a presión .....	42
Figura 2.19. Refrigerador/ intercambiador de calor para soplantes Kaeser.....	43
Figura 2.20. Cambios de parámetros con la compresión, la refrigeración y secado.....	45
Figura 2.21. Partes secador de membrana Kaeser. ....	46
Figura 2.22. Secadores de adsorción ADS 1-215 marca Ceccato.....	48
Figura 2.23. Tratamiento del aire comprimido con secador refrigerativos y desecante .....	50
Figura 2.24. Depósito de aire comprimido marca Ceccato.....	51
Figura 2.25. Diagrama de producción de gases medicinales por el sistema criogénico .....	54
Figura 2.26. Diagrama del sistema PSA de producción in situ de oxígeno medicinal .....	56
Figura 2.27. Estándares nacionales para la implantación de SGE.....	63
Figura 2.28. Modelo de gestión de la energía.....	65
Figura 2.29. Planificación energética.....	70
Figura 3.1. Monitores de electricidad Wireless Eyedro.....	74
Figura 3.2. Pinza amperimétrica modelo PM2016A .....	75
Figura 3.3. Cuarto de máquinas .....	76
Figura 3.4. Equipos del sistema de generación de aire comprimido y oxígeno.....	78
Figura 3.5. Instalación de sensores y módulos de sensores marca Eyedro.....	82
Figura 3.6. Software My Eyedro.....	82
Figura 3.7. Consumo de energía de las combinaciones de compresores .....	84

Figura 3.8. Costes de la producción de aire comprimido y oxígeno.....	87
Figura 3.9. Diagrama de Pareto consumos de energía – Producción aire comprimido .....	87
Figura 3.10. Diagrama de Pareto consumos de energía – Producción de oxígeno .....	88
Figura 3.11. Consumo del sistema de oxigeno medicinal en la clínica .....	88
Figura 3.12. Diagrama de flujo del calor. ....	89
Figura 3.13. 13. Funcionamiento de la recuperación de calor .....	90
Figura 3.14. Herramienta para cálculo de condensado Kaeser Compresores .....	92

## **Capítulo 1 Descripción del proyecto**

### **1.1. Introducción**

Si bien las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consiguiente cambio climático no son los únicos problemas ambientales que enfrenta el sector energético, son los más universales y urgentes. Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía aumentarán de 27.1 Gt CO<sub>2</sub> / año en 2008 a 40.4 Gt CO<sub>2</sub> / año en 2030. Más de tres cuartas partes de este crecimiento provienen de países en desarrollo. China, que supera a Estados Unidos como el mayor emisor del mundo antes de 2010, representa el 39% del incremento global entre 2004 y 2030. Sus emisiones se duplican con creces entre 2004 y 2030, impulsadas por un fuerte crecimiento económico y una gran dependencia del carbón en la generación de energía. India representa el 10% del aumento de las emisiones globales (Kaygusuz, 2012).

Se entiende por gestión energética al conjunto de actividades administrativas de planeación, organización, dirección y control que se ejecutan con el objetivo de utilizar la menor cantidad de Energía posible al desarrollar todos los procesos necesarios para producir, comercializar y distribuir bienes o para la prestación de servicios conservando la calidad. La GE se puede aplicar en cualquier tipo de organización que requiera de Energía (Castrillon Mendoza, Quispe Oqueña, Gonzales Hinestroza, Urhan Rojas, & Fandiño Gutierrez, 2014) (Abdulaziz , Saidur, & Saad , 2011). Es un proceso de mejora continua en el desempeño energético a través del control, monitoreo, planificación y el desarrollo de acciones y estrategias para incrementar la eficiencia energética (Bunse, Vodicka, Schoensleben, Brühlhart, & Ernst, Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature, 2011). Los indicadores de eficiencia son fundamentales para determinar las estrategias viables de suministro de Energía, los costos de producción, entre otros.

El consumo de energía en el sector industrial representa más del 50% del consumo de energía a nivel mundial, en países como Australia, Italia, Francia, China y Estados Unidos, el consumo de energía de los sistemas de aire comprimido (SAC) contribuye aproximadamente al 10% del consumo total de energía eléctrica en la industria (Mousavi, Kara, & Kornfeld, 2014); (Benedettia, y otros, 2017);(Benedetti, 2017); (Saidur, Rahimb, & Hasanuzzaman, 2010); (Nehler, 2018). En Colombia es el 8%, equivalente a 1.39TWh /año (UPME INCOMBUSTION, 2013); (UPME CORPOEMA, 2014); (UPME CORPOEMA, 2014).

Un sistema de aire comprimido adecuadamente administrado puede ahorrar energía, reducir el mantenimiento, reducir el tiempo de inactividad, aumentar el rendimiento de la producción y mejorar la calidad del producto (Comisión nacional para el uso Eficiente de la Energía - CONUEE, 2009).

La presente investigación se desarrolla en una clínica privada de alta complejidad, y se estructura de la siguiente manera. Un capítulo inicial en el cual se describe la problemática identificada, que conlleva a realizar la evaluación de la eficiencia energética del sistema de aire comprimido, su alcance y metodología. En el segundo capítulo se describe las etapas de los sistemas PSA y el sistema de aire comprimido su principal componente. Un tercer capítulo donde se muestra la implementación de la metodología; se identifica los principales factores que inciden en el consumo energético del sistema de aire comprimido y se aplican un grupo de acciones de los cuales se obtienen ahorros significativos en el consumo de energía.

## **1.2. Planteamiento del Problema.**

Los sistemas de aire comprimido son muy utilizados, debido a su limpieza, velocidad de operación, par constante a presión constante, incluso a bajas velocidades de rotación y manejo sin riesgo, a menudo se considera la “cuarta utilidad después de la electricidad, el gas y el agua”

(Zahlan & Asfour, 2015);(Agricola & Radgen, 2003); (Kaya, Phelan, Chau, & Sarac, 2002); (Saidur, Rahimb, & Hasanuzzaman, 2010); (U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003); (European Commission, 2009). En países como Australia, Italia, Francia, China y Estados Unidos, el consumo de energía de los sistemas de aire comprimido (SAC) contribuye aproximadamente al 10% del consumo total de energía eléctrica en la industria (Mousavi, Kara, & Kornfeld, 2014); (Benedettia, y otros, 2017); (Benedetti, 2017); (Saidur, Rahimb, & Hasanuzzaman, 2010); (Nehler, 2018). En Colombia es el 8%, equivalente a 1.39TWh /año (UPME INCOMBUSTION, 2013); (UPME CORPOEMA, 2014); (UPME CORPOEMA, 2014), A partir de la revisión bibliográfica realizada se pudo observar que en el sector industrial existen un gran número de estudios e investigaciones en los SAC mientras que en las clínicas este comportamiento es muy diferente y adolecen de estos estudios por lo que no cuentan con la información sobre el consumo de energía en los sistemas para aire comprimido que les permita tomar acciones de Eficiencia energética..

En las clínicas de alta complejidad los sistemas de aire comprimido tienen gran importancia ya que se utilizan para la producción de gases medicinales, y se consume gran cantidad de oxígeno medicinal que es de vital importancia para los pacientes, lo cual representa un alto costo en la generación de aire para dichas instituciones, son sistemas que trabajan veinticuatro horas al día, los siete días de la semana (24/7), por ende, el consumo eléctrico de ellos siempre va a representar una porción del 12 al 20% en la facturación eléctrica mensual de la clínica.

En los SAC se ha identificado que las pérdidas de energía pueden representar hasta un 60 % en calor, fugas, usos ineficientes entre otros (Mousavi, Kara, & Kornfeld, 2014); (Nehler,

2018); (Benedetti, 2017). Sin embargo, en las clínicas no se conoce los valores de estos consumos, no se conoce la eficiencia del sistema ni existen indicadores para poder realizar una correcta gestión.

De acuerdo con los costos totales del ciclo de vida (LCC), la energía eléctrica para operar un SAC es de alrededor del 75% del costo total, mayor del 13% de la inversión inicial y el mantenimiento de los compresores, (Saidur, Rahimb, & Hasanuzzaman, 2010); (Radgen, Greenhous gas emissions reduction by motor systems—The case of compressed air systems in power generation and industry. In Greenhouse Gas Control Technologies 7, 2005); (Kaya, Phelan, Chau, & Sarac, 2002); (European Commission, 2009); (Mousavi, Kara, & Kornfeld, 2014); (Yang, 2009); (Dudic, Ignjatovic, Šešlija, Blagojevic, & Stojiljkovic, 2012).

Por lo que aplicar las medidas de eficiencia energética permite a las empresas disminuir los consumos de energía con su respectiva implicación en los costos y su impacto ambiental. En la clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de barranquilla no se conoce estos valores ni existe una gestión eficiente de la energía en el SAC.

**¿Se podrá mejorar la eficiencia energética en el SAC de la clínica de alta complejidad a partir de una caracterización e implementación de medidas de eficiencia energética?**

### **1.3. Justificación.**

El aire comprimido es relativamente costoso de generar y aporta una gran parte del consumo total de energía en las clínicas. En Australia y los países europeos, el consumo de energía de los sistemas de aire comprimido aporta aproximadamente el 10% de la energía total en el sector industrial (State Government Victoria) (Radgen & Blaustein, Compressed air systems in the European Union. Energy, emissions, savings potential and policy actions, 2001);

(Mousavi, Kara, & Kornfeld, 2014). En Colombia este valor alcanza el 8%, equivalente a 1.39TWh /año. En un estudio realizado en más de 500 empresas de diferentes países arroja que las mejoras en la eficiencia energética de los sistemas de aire comprimido puede lograr un ahorro de energía del 20 al 50% (UPME INCOMBUSTION, 2013); (UPME CORPOEMA, 2014); (UPME CORPOEMA, 2014).

Los proyectos que se han desarrollado a nivel mundial para disminuir el consumo de energía en los SAC han pasado a ser de primera prioridad a todos los niveles de discusión. En los últimos años, la eficiencia energética de los sistemas de aire comprimido se ha transformado en un tema cada vez más importante y está siendo criticado por dos razones principales: En el ciclo de vida el consumo de energía eléctrica representa un 75 %, un valor considerablemente mayor a los costos de inversión y mantenimiento, en segundo lugar, las oportunidades de ahorro en estos sistemas son muy elevadas con unos periodos de recuperación muy cortos los que las hace muy viables.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la eficiencia energética del sistema de aire comprimido en una clínica privada de la ciudad de barranquilla para cuantificar el valor del consumo y las pérdidas para las diferentes medidas; esto permitirá dar los primeros pasos para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía que a mediano plazo complemente el Sistema Integrado de Gestión de la clínica. Cabe resaltar que estudios similares no se han realizado en clínicas y hospitales.



## **1.4. Objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo general.**

Evaluar la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido en una clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla considerando las variables que inciden en el comportamiento energético.

### **1.4.2. Objetivos específicos.**

Realizar una revisión bibliográfica sobre las medidas de Eficiencia Energética en los sistemas de aire comprimido.

Efectuar una caracterización del sistema de aire comprimido de una clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla en el objeto de estudio seleccionado.

Cuantificar el valor de las pérdidas para las diferentes medidas y plantear las recomendaciones a implementar para mejorar la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido.

## **1.5. Metodología**

Para llevar a cabo la evaluación del sistema de aire comprimido del caso de estudio se siguió la metodología que se presenta a continuación:

### **1.5.1. Recopilación de información.**

Para realizar un análisis adecuado del estado real de la clínica en lo que a aire comprimido se refiere, era necesario conocer datos como: cuántos equipos trabajan con aire comprimido, cuáles son los requerimientos de consumo de estos equipos, la calidad del aire que se necesita, el estado de los equipos del cuarto de compresores, entre otros.

### **1.5.2. Análisis de la información.**

Teniendo toda la información disponible se ejecutaron los cálculos para el consumo del sistema de aire comprimido en la generación de oxígeno, almacenamiento y transporte, así como, el ahorro en la producción del oxígeno Vs criogénico, recuperación del calor y reaprovechamiento de condensados.

### **1.5.3. Alcances y limitaciones.**

En este proyecto se evaluará el estado actual del sistema de aire comprimido del caso de estudio, una vez que se tenga el conocimiento de su estado se plantearán recomendaciones para mejorar la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido, sin embargo, esto no implica que las recomendaciones sean aplicadas por la clínica.

A continuación, en la tabla 1.7.1 se presenta la Matriz de Actividades que muestra la relación entre los objetivos, las actividades y una breve descripción de éstas desarrolladas en el marco de la investigación.

Tabla 1  
Matriz de actividades

Objetivo General	Objetivos específicos	No	Actividad	Descripción
Evaluar la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido en una clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla considerando las variables que inciden en el comportamiento energético.	Realizar una revisión bibliográfica sobre las medidas de Eficiencia Energética en los sistemas de aire comprimido.	1	Revisión bibliográfica	Realizar una búsqueda de información especializada sobre los sistemas de aire comprimido, sus componentes y su eficiencia energética, identificar las publicaciones seriadas que publican sobre el tema y los principales autores.
				Sistematizar la información recopilada y obtención de conclusiones al respecto.
	Efectuar una caracterización del sistema de aire comprimido de una clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla en el objeto de estudio seleccionado.	1	Realizar un análisis adecuado del estado real del sistema de aire comprimido.	Recopilación de la información del sistema de aire comprimido de la clínica utilizado en la producción de oxígeno medicinal in situ utilizando la técnica PSA para su procesamiento que permita realizar propuestas de desempeño energético.
		2	Realizar mediciones de consumo de energía.	Realizar los análisis de regresión requeridos para analizar y evaluar el desempeño energético del sistema de aire comprimido.
				Instalación de los monitores de electricidad en tiempo real en el SAC y recopilación de la información del consumo y posibles pérdidas energéticas.

Cuantificar el valor de las pérdidas para las diferentes medidas y plantear las recomendaciones a implementar para mejorar la eficiencia energética en el sistema de aire comprimido.	1	Evaluación y cálculos de los principales parámetros operacionales que influyen en la eficiencia energética del SAC.	Procesamiento estadístico de la información y determinación de los parámetros operacionales que influyen en la eficiencia energética del SAC y la forma en que lo hacen.
	2	Evaluación de campo de las prácticas operacionales, implementación y evaluación de los resultados	Realizar los cálculos para el consumo del sistema de aire comprimido en la generación de oxígeno, almacenamiento y transporte, así como, el ahorro en la producción del oxígeno Vs criogénico, recuperación del calor y reaprovechamiento de condensados.  Propuesta de acciones para eliminar las deficiencias identificadas.  Implementar y evaluar los resultados obtenidos en el SAC.

*Fuente:* Elaboración propia.

## **Capítulo 2      Revisión de la literatura.**

Coherente con el propósito de la presente investigación, el cual posteriormente será abordado, se hace necesario documentar los siguientes ejes temáticos: introducción a los sistemas de aire comprimido, componentes principales de un sistema de aire comprimido, producción de Oxígeno mediante el Sistema Criogénico y producción de oxígeno mediante un sistema de adsorción por variación de presión. De cada uno de estos temas se hace inicialmente una sucinta exploración, para identificar cuál es su estado del arte.

### **2.1.      Introducción a los Sistemas de aire comprimido.**

Según (Chiavenato, 2014), un sistema puede definirse como un conjunto de elementos dinámicamente relacionados entre sí, que realizan una actividad para alcanzar un objetivo, operando sobre entradas (información, energía o materia) y proveyendo salidas (información, energía o materia) procesadas. Los elementos, las relaciones entre ellos y los objetivos o propósitos constituyen los aspectos fundamentales de la definición de un sistema, figura 2.1. Y según (Bertalanffy, 1992), sistema es un conjunto o combinación de cosas o partes que forman un todo complejo o unitario; un conjunto de unidades recíprocamente relacionadas. De ahí se deducen dos conceptos: propósito y totalidad.

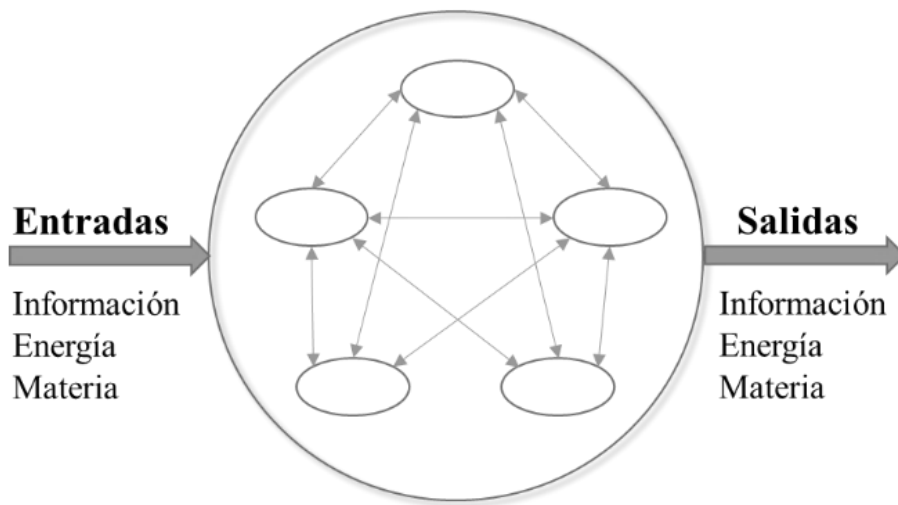


Figura 1. Ejemplo de sistema (Chiavenato, 2014).

- **Propósito:** todo sistema tiene uno o varios propósitos. Los elementos, como también las relaciones, definen una distribución que tratan siempre de alcanzar un objetivo.
- **Totalidad:** un cambio en uno de los elementos del sistema, posiblemente producirá cambios en los otros. El efecto total se presenta como un ajuste a todo el sistema. Hay una relación de causa/efecto. De estos cambios y ajustes, se derivan dos fenómenos: entropía y homeostasia.
- **Entropía:** es la tendencia de los sistemas a desgastarse, a desintegrarse, para el relajamiento de los estándares y un aumento de la aleatoriedad. La entropía aumenta con el correr del tiempo.
- **Homeostasia:** es el equilibrio dinámico entre las partes del sistema. Los sistemas tienen una tendencia a adaptarse con el fin de alcanzar un equilibrio interno frente a los cambios externos del entorno. Una clasificación podrá ser entendida como un sistema o subsistema o un súper sistema, dependiendo del enfoque.

Los elementos, que constituyen las partes que componen el sistema, están dinámicamente relacionados entre sí como se muestra en el ejemplo de la figura 2.1 y mantienen una interacción constante.

## 2.2. Generalidades del aire comprimido.

El efecto de aumentar la presión al aire atmosférico en un proceso de compresión, se conoce como aire comprimido, figura 2.2. Este último contiene cierta cantidad de humedad, que puede ser mayor o menor según el país, la localidad, las condiciones climatológicas y las estaciones del año. La capacidad del aire para retener vapor de agua, está relacionada con la temperatura y la presión (Brown, 2005).

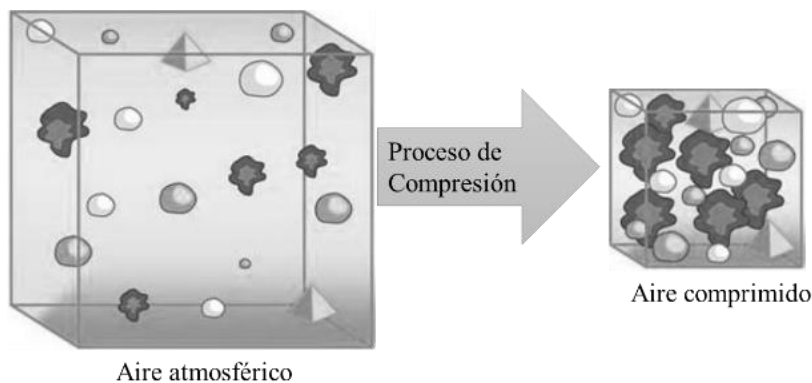


Figura 2. Compresión del aire atmosférico (Brown, 2005).

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. El aire seco es la parte de la mezcla compuesta solamente por nitrógeno y oxígeno, y el vapor de agua es lo que se denomina humedad. Existen dos estados extremos del aire atmosférico: el aire seco en el que no hay absolutamente nada de vapor de agua y el aire saturado de humedad en el que la mezcla contiene todo el vapor de agua que puede absorber el aire seco a esa temperatura. El aire seco puede absorber más vapor de agua si se lo calienta, y condensa agua líquida en forma de gotas si

se lo enfría. Cuando la condensación ocurre sobre una superficie sólida origina la condensación por goteo o rocío. Por eso se suele denominar punto de rocío a la temperatura a la que se condensa un vapor (Rodríguez, 2009).

Alimentado por electricidad, un compresor de aire típico toma aproximadamente 7 volúmenes de aire en condiciones atmosféricas, y lo comprime en 1 volumen a presión elevada (aproximadamente 100-125 psi). El aire de alta presión resultante se distribuye a los equipos, herramientas o filtros. En el proceso de compresión, y el posterior enfriamiento del aire a temperatura ambiente, el calor y la humedad, son liberados, como se ilustra en la Figura 2.3.

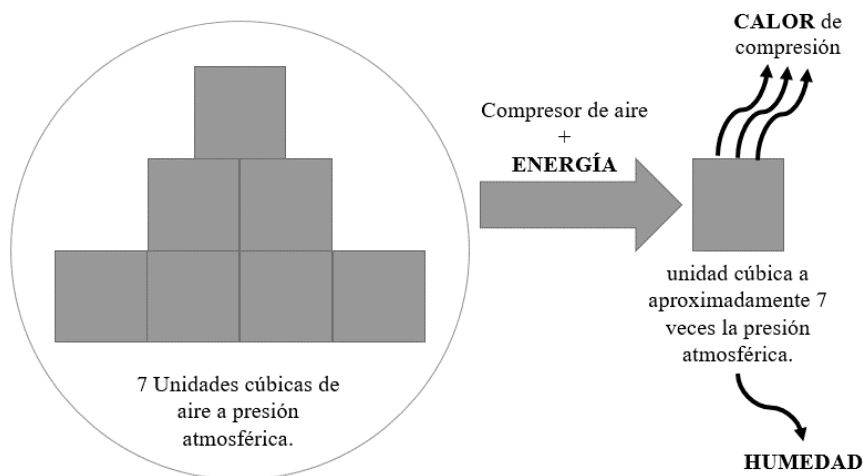


Figura 3. Liberación de calor y humedad en el proceso de conversión del aire atmosférico en aire comprimido (Da Cunha P, 2007).

### 2.3. Aire comprimido en clínicas medicinales.

Los SAC se utilizan en las instituciones hospitalarias de alta complejidad en el proceso de producción de oxígeno medicinal in situ utilizando la técnica PSA (Pressure Swing Adsorption) que consiste en someter el aire atmosférico comprimido a un proceso de purificación utilizando filtros específicos y, posteriormente, a separación de sus componentes a través de la absorción. Se implementan estos sistemas PSA de producción de oxígeno porque se



consumen grandes cantidades de gases medicinales, entre ellos el oxígeno, que ayuda en la recuperación de los pacientes, utilizando la oxigenoterapia que es una modalidad terapéutica que pretende aumentar la presión parcial de oxígeno en sangre arterial ( $PaO_2$ ), a través de un aumento de la concentración de oxígeno en el aire inspirado (fracción inspiratoria de oxígeno,  $FiO_2$ ) (López-Herce, Calvo, Lorente, Jaimovich, & Baltodao, 2001) (Morris, 1997).

El Oxígeno es un gas medicinal y, como tal, debe cumplir con controles de calidad y trazabilidad, entre otros, y sus procesos productivos deben contar con procedimientos de calidad auditables. El oxígeno medicinal debe contar con el registro sanitario como producto farmacéutico, el cual exige dossier de producto y respaldo de estudios clínicos que confirmen sus beneficios y aplicaciones (Ministerio de la protección social. Republica de Colombia, 2007).

La producción de oxígeno puede realizarse por licuefacción del aire o adsorción. Según los estándares de (United States Pharmacopeia) (USP) en este caso específicamente USP37, el oxígeno producido por licuefacción debe tener una pureza de 99% y está exento de análisis de CO y CO<sub>2</sub>. En el caso del producido por adsorción, a diferencia del anterior, la USP exige una pureza de 93% y un análisis de las impurezas, estableciendo límites tolerables para el organismo humano, determinando que no debe exceder de un máximo de 300 ppm de CO<sub>2</sub> y de 10 ppm de CO, mientras la (European Pharmacopoeia) define como oxígeno medicinal sólo aquel que ha sido obtenido por proceso de licuefacción del aire, el que debe cumplir con un mínimo de pureza de 99,5 %, pero también exige el cumplimiento del control de impurezas con los siguientes niveles de tolerancia: máximo de 300 ppm de CO<sub>2</sub> y 5 ppm de CO. A este control se suma el análisis de humedad que determina un máximo de 67 ppm (Ministerio de la protección social. Republica de Colombia, 2007).

## 2.4. Componentes principales de un sistema de aire comprimido.

Un sistema de aire comprimido está constituido por una serie de equipos y accesorios capaces de proporcionar el caudal necesario de aire bajo las condiciones de presión y temperatura, así como de calidad requeridas de acuerdo a las necesidades.

Los elementos que constituyen un sistema de aire comprimido son: compresores, secadores, filtros y tanques de almacenamiento, figura 2.4. Los cuales se describen en las siguientes secciones.

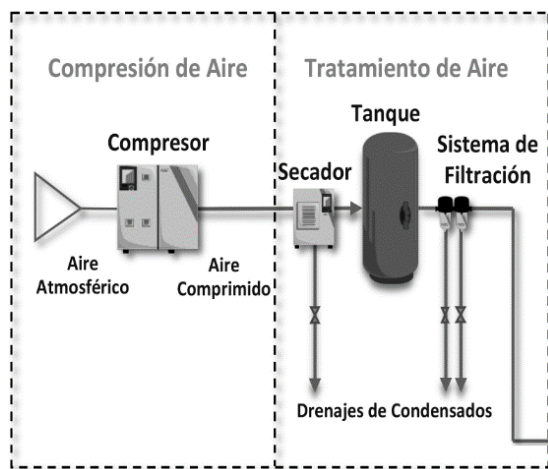


Figura 4. SAC y elementos. Adaptado de (Nehler, 2018); (DoE, U. S., 1998).

### 2.4.1. Compresores

Los compresores son máquinas impulsoras de aire, gases o vapores, que ejercen influencia sobre las condiciones de presión. Se montan en salas especialmente acondicionadas, aunque el uso cada vez más frecuente de compresores sofisticados y silenciosos da mayor flexibilidad a la instalación. Los propios compresores integran refrigeradores para el aire comprimido y para el aceite refrigerador de la cámara de compresión (Da Cunha P, 2007).

Las características fundamentales de un compresor son el caudal suministrado y la presión. La unidad de medida del caudal suministrado o capacidad del compresor viene indicada en aire aspirado a presión atmosférica y a temperatura normal, concretamente a 1,013 bares de presión, 20°C de temperatura y a un 65% de humedad relativa. La nomenclatura utilizada para expresar estas condiciones suele ser la siguiente: N l/min o N m<sup>3</sup>/min. Es importante destacar que, el caudal suministrado por el compresor debe adaptarse al consumo general de los diferentes elementos de trabajo de la planta.

En (Atlas Copco Airpower NV, 2015) y (Kaeser compresores, 2017) , las cantidades generación o consumo de aire suelen referirse a aire libre por minuto. Si no es así, deberá realizarse la conversión para conocer el caudal concreto que circula por la red a la presión de trabajo de la misma. La relación utilizada es la siguiente:

$$Q = Q_p \times (P + P_{atm})/P_{atm}$$

donde:

Q = caudal de aire libre

Q<sub>p</sub> = caudal de aire comprimido a la presión P

P = Presión del aire comprimido

P<sub>atm</sub> = Presión atmosférica

Por consiguiente, para determinar la capacidad de los compresores, se partirá del consumo total de la clínica, al cual habrá que añadirle un porcentaje por pérdidas de aire admisible por fugas, así como sumarle otro porcentaje adicional para prever posibles ampliaciones.

Según (Barber, 1997) (U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003) ) existen dos principios genéricos de compresión de aire (o gas): la compresión de desplazamiento y la compresión dinámica.

Los compresores de desplazamiento positivo incluyen, entre otros, los alternativos (pistón), scroll y diferentes tipos de compresores rotativos (tornillo, uña, paletas), ver figura 2.5.

En la compresión de desplazamiento positivo, el aire se aspira en una o varias cámaras de compresión, donde queda confinado. El volumen de cada cámara disminuye gradualmente y el aire se comprime internamente. Cuando la presión alcanza la relación de presiones establecida, se produce la apertura de una lumbrera o una válvula y el aire se descarga al sistema de salida debido a la reducción continua del volumen en la cámara de compresión.

En la compresión dinámica, el aire se aspira entre los álabes de un rodete que gira con rapidez y acelera a gran velocidad. Después se descarga a través de un difusor, donde la energía cinética se transforma en presión estática. La mayoría de los compresores dinámicos son turbocompresores con un patrón de flujo axial o radial. Todos están diseñados para grandes caudales volumétricos.

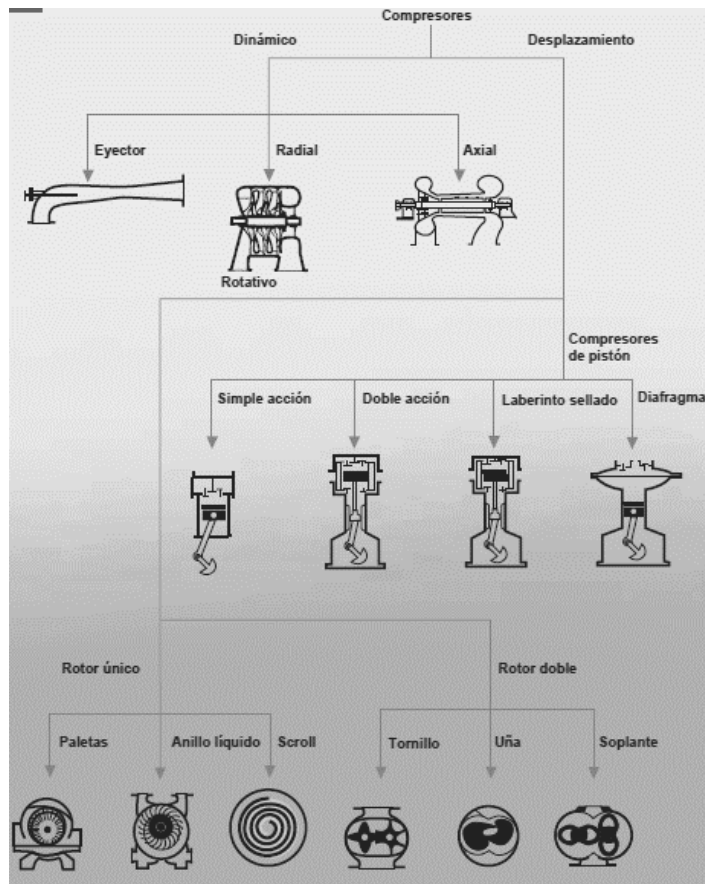


Figura 5. Tipos de compresores más comunes clasificados según sus principios de funcionamiento (Atlas Copco Airpower NV, 2015) (U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003)

#### 2.4.1.1. Compresores de desplazamiento.

Un compresor de desplazamiento encierra un volumen de gas o aire y después incrementa la presión reduciendo dicho volumen mediante el desplazamiento de uno o más miembros en movimiento, a continuación, se describen los diferentes tipos de estos compresores.

##### 2.4.1.1.1. Compresores de pistón.

El compresor de pistón es el más antiguo y común de todos los compresores industriales. Está disponible en variantes de simple o doble efecto, lubricado o exento de aceite y con diversos números de cilindros en diferentes configuraciones. Con la excepción de algunos compresores

muy pequeños con cilindros verticales, la configuración en V es la más habitual en compresores de pequeño tamaño.

En los compresores grandes de doble efecto, la configuración en L con cilindro vertical de baja presión y con cilindro horizontal de alta presión, ofrece unas ventajas inmensas que lo han convertido en el diseño más corriente. Los compresores lubricados con aceite funcionan normalmente con lubricación por salpicadura o lubricación a presión. La mayoría de los compresores tienen válvulas auto accionadas. Una válvula auto accionada abre y cierra por el efecto de las diferencias de presión en ambos lados del disco (Barber, 1997).

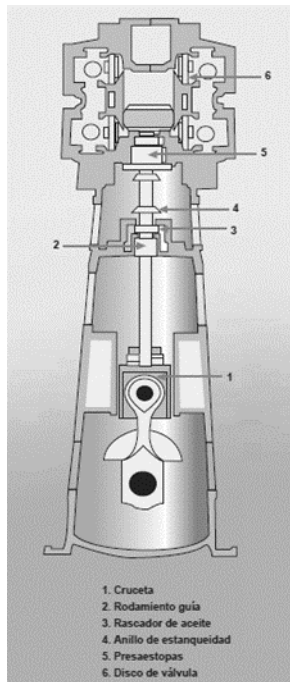


*Figura 6. Compresor de pistón (Martínez Costa, 2019).*

#### **2.4.1.1.2. Compresores de pistón exentos de aceite.**

Los compresores de pistón exentos de aceite tienen segmentos de PTFE o carbón. Alternativamente, el pistón y la pared del cilindro pueden estar perfilados (dentados) como en los compresores de laberinto, figura 2.7. Las máquinas de mayor tamaño están equipadas con una cruceta y retenes en los bulones y una pieza intermedia ventilada para evitar que el aceite se

transfiera del cárter a la cámara de compresión (Atlas Copco Airpower NV, 2015). Los compresores pequeños tienen a menudo un cárter con rodamientos sellados de por vida.



*Figura 7. Figura 2.7. Compresor de pistón de laberinto sellado, doble efecto, exento de aceite con cruceta (Atlas Copco Airpower NV, 2015).*

#### **2.4.1.1.3. Compresor de diafragma.**

Los compresores de diafragma forman un grupo diferente. Su diafragma es de accionamiento mecánico o hidráulico. Los compresores de diafragma mecánico se utilizan con un flujo pequeño y baja presión o como bombas de vacío. Los compresores de diafragma hidráulicos se utilizan para aplicaciones de alta presión (Atlas Copco Colombia Ltda, 2017).

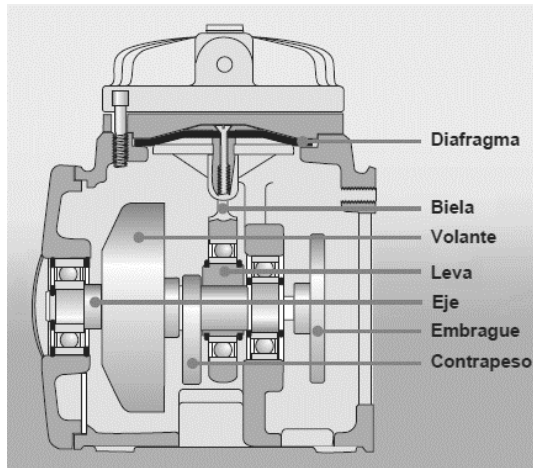
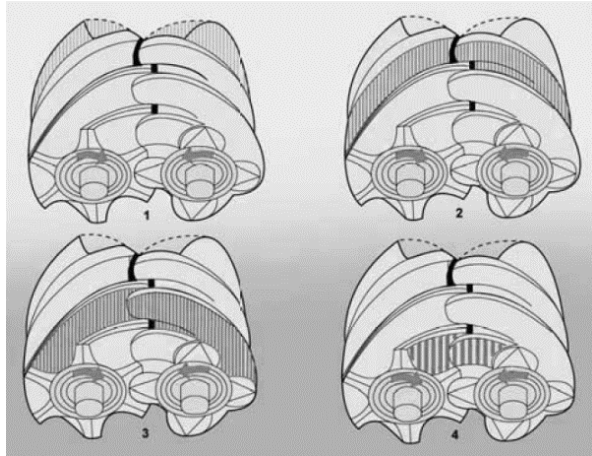


Figura 8. Compresor de diafragma mecánico (Atlas Copco Airpower NV, 2015).

#### 2.4.1.1.4. Compresores de tornillo.

El compresor de tornillo es un compresor de desplazamiento con pistones en un formato de tornillo, ver figura 2.9.; éste es el tipo de compresor predominante en uso en la actualidad. Las piezas principales del elemento de compresión de tornillo comprenden rotores machos y hembras que giran en direcciones opuestas mientras disminuye el volumen entre ellos y la carcasa, lo que comprime el aire. Cada elemento de tornillo tiene una relación de presiones integrada fija que depende de su longitud, del paso del tornillo y de la forma de la ventana de descarga. Para lograr la máxima eficiencia, la relación de presiones integrada se debe adaptar a la presión de trabajo requerida (DoE, U. S., 1998); (Atlas Copco Airpower NV, 2015).





*Figura 9. Compresión en un compresor de tornillo. Figura 1: el aire llena el espacio entre los rotores, 2-4: el espacio encerrado disminuye gradualmente y la presión aumenta (Atlas Copco Airpower NV, 2015).*

El compresor de tornillo no está equipado generalmente con válvulas y no tiene fuerzas mecánicas que ocasionen desequilibrio. Esto significa que puede funcionar con una alta velocidad del eje y puede combinar un gran caudal con unas pequeñas dimensiones exteriores. La fuerza axial, que depende de la diferencia de presión entre la entrada y la salida, debe ser absorbida por los rodamientos (Atlas Copco Airpower NV, 2015).

La ventaja del compresor de tornillo frente a otro tipo de compresores es que proporciona un flujo continuo de aire, debido a sus helicoidales, y éste llega a las máquinas totalmente libre de aceite. A continuación, se describen los tipos de compresores de tornillos:

- **Compresores de tornillo exentos de aceite:** Los primeros compresores de tornillo tenían un perfil simétrico y no usaban ningún líquido de refrigeración en la cámara de compresión. Pasaron a llamarse compresores de tornillo exentos de aceite o secos. Los modernos compresores de tornillo exentos de aceite de alta velocidad tienen perfiles asimétricos, lo que mejora sensiblemente la eficiencia energética merced a la reducción de las fugas internas. Se emplean frecuentemente engranajes externos para sincronizar la posición de los rotores que giran en sentido contrario. Como los rotores no hacen contacto

entre sí ni con la carcasa, no se necesita lubricación dentro de la cámara de compresión, figura 2.10. Por consiguiente, el aire comprimido está completamente libre de aceite. Los rotores y la carcasa se fabrican con gran precisión para minimizar las fugas desde el lado de presión al lado de aspiración. La relación de presiones integrada está limitada por la diferencia de temperatura entre la aspiración y la descarga. Este es el motivo por el que los compresores de tornillo exentos de aceite se fabrican frecuentemente con varias etapas y refrigeración intermedia para lograr mayores presiones (Comisión nacional para el uso Eficiente de la Energía - CONUEE, 2009); (Atlas Copco Airpower NV, 2015); (DoE, U. S., 1998).

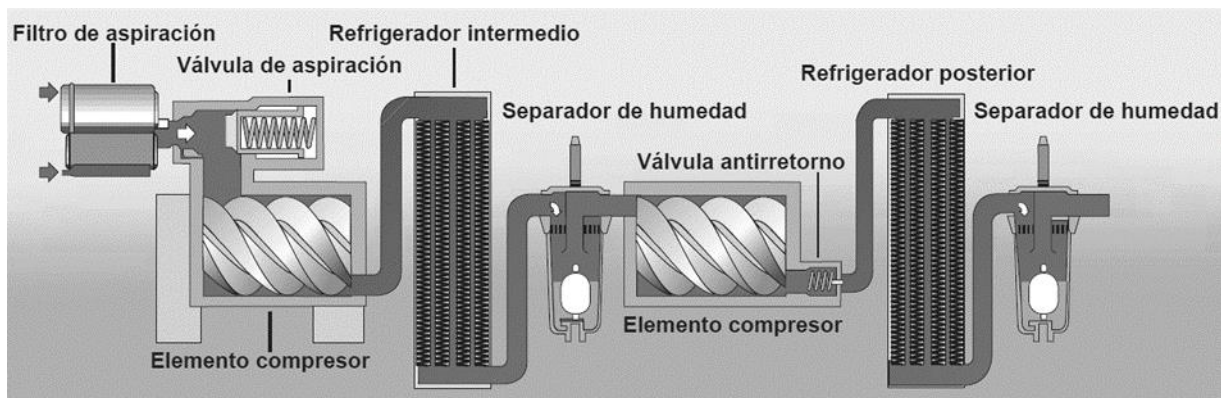


Figura 10. Diagrama de flujo de un compresor de tornillo exento de aceite (Atlas Copco Airpower NV, 2015).

- **Compresores de tornillo con inyección de líquido:** En los compresores de tornillo con inyección de líquido, se inyecta un líquido en la cámara de compresión y a veces en los rodamientos del compresor, figura 2.11. Su función es enfriar y lubricar las piezas móviles del elemento compresor, enfriar el aire que se comprime internamente y reducir las fugas de retorno a la aspiración. En la actualidad, el aceite es el líquido más habitual debido a sus buenas propiedades de lubricación y sellado, aunque también se emplean otros líquidos, como agua o polímeros. Es posible fabricar elementos compresores de tornillo con inyección de líquido para una alta relación de presiones, siendo suficiente

normalmente una etapa de compresión para presiones de hasta 14 bar, e incluso 17 bar, aunque a costa de reducir la eficiencia energética.

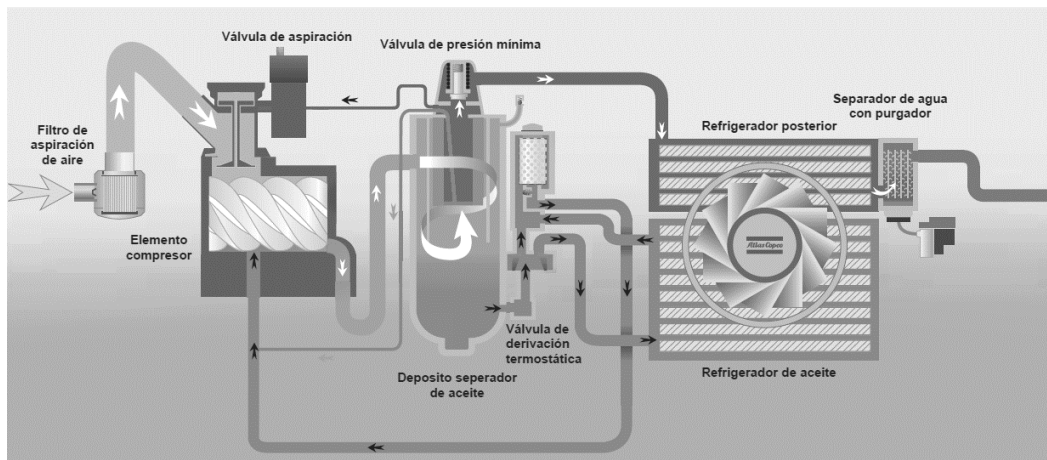


Figura 11. Diagrama de flujo de un compresor de tornillo con inyección de aceite (Atlas Copco Airpower NV, 2015).

#### 2.4.1.1.5. Compresores scroll.

Según (Chikano, Yanagase, Matsunaga, & Tojo, 2014) el scroll es un tipo de compresor de desplazamiento orbital normalmente exento de aceite, es decir, comprime una cantidad determinada de aire en un volumen que disminuye de manera continua. El elemento compresor consta de una espiral fija en una carcasa y una espiral móvil excéntrica accionada por un motor, figura 2.12. Las espirales están montadas con un desfase de 180° para formar bolsas de aire con un volumen que varía gradualmente. Esto proporciona estabilidad radial a los elementos de desplazamiento. Las fugas se minimizan porque la diferencia de presión en las bolsas de aire es inferior a la diferencia de presión entre la entrada y la salida. La espiral móvil está impulsada por un cigüeñal de carrera corta y se mueve excéntricamente alrededor del centro de la espiral fija. La aspiración está situada en la parte superior de la carcasa del elemento. Cuando la espiral móvil se mueve, el aire se aspira y queda atrapado en una de las bolsas de aire, donde se comprime gradualmente mientras se mueve hacia el centro, donde están situadas la salida y una

válvula antirretorno. El ciclo de compresión se lleva a cabo durante 2,5 vueltas, lo que prácticamente proporciona un flujo de aire constante y libre de pulsaciones. El proceso es relativamente silencioso y sin vibraciones, ya que el elemento apenas tiene variación de par comparado, por ejemplo, con un compresor de pistón.

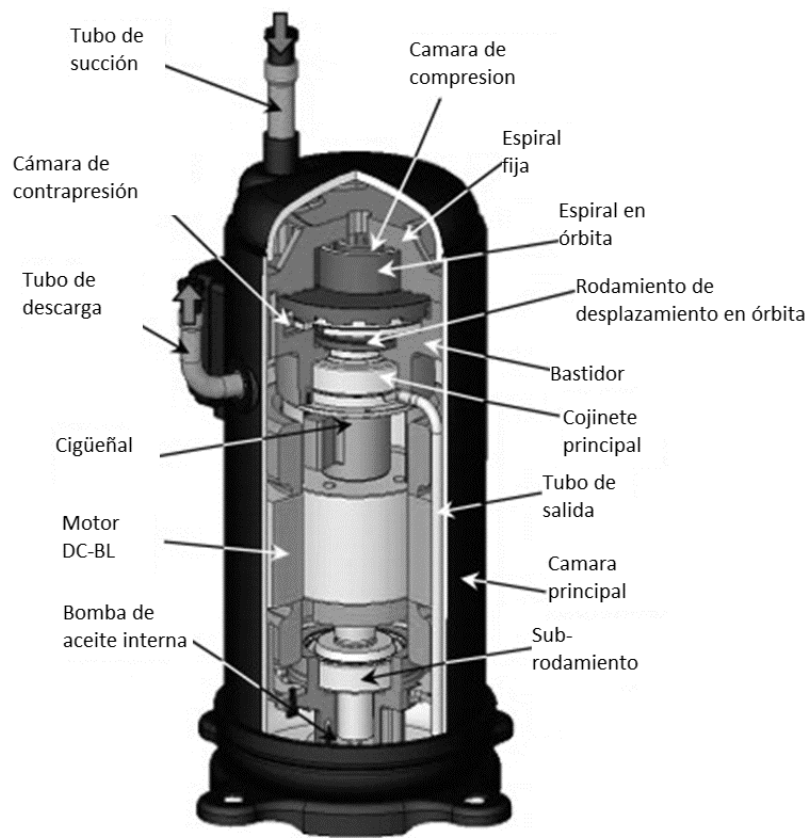


Figura 12. Estructura de un compresor scroll (Chikano, Yanagase, Matsunaga, & Tojo, 2014).

#### 2.4.1.1.6. Compresores de paletas.

El principio de funcionamiento de un compresor de paletas es el mismo que el de muchos motores de expansión de aire comprimido. Por lo general, las paletas se fabrican con aleaciones de fundición especiales y la mayoría de los compresores de paletas están lubricados con aceite. Un rotor con paletas radiales y móviles en forma de hoja está montado excéntricamente en una carcasa o estator. Cuando gira, las paletas se presionan contra las paredes

del estator por la fuerza centrífuga. El aire se aspira cuando aumenta la distancia entre el rotor y el estator. El aire se captura en las diferentes bolsas del compresor, cuyo volumen se reduce con la rotación. El aire se descarga cuando las paletas pasan por la lumbrera de salida, figura 2.13.

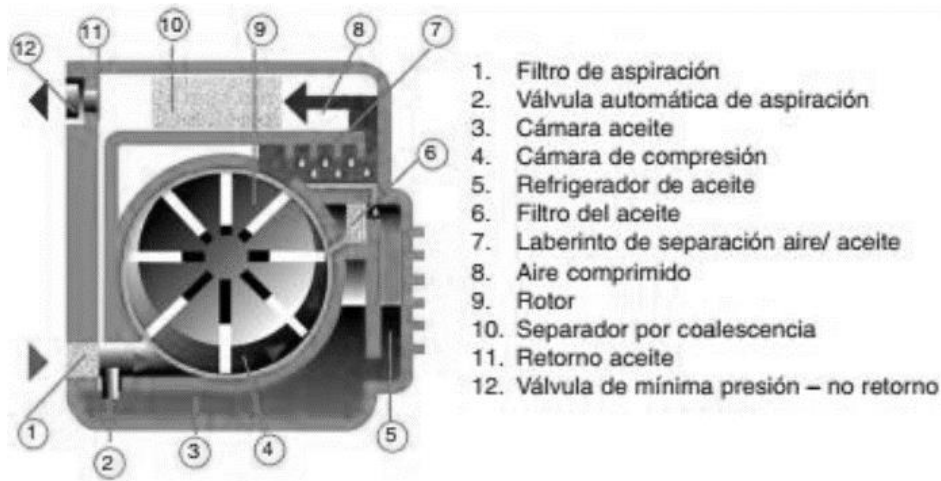


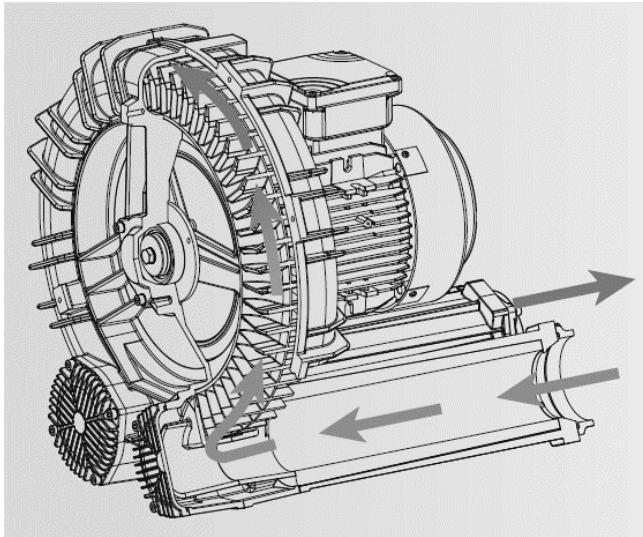
Figura 13. Esquema de un compresor de paleta Mattei (Mattei Compressed Air Since 1919, 2019).

#### 2.4.1.1.7. Soplantes Roots.

Los soplante "Roots" son compresores de desplazamiento sin compresión interna y sin válvula que generan un flujo de aire de baja presión (Mattei Compressed Air Since 1919, 2019). Cuando la cámara de compresión entra en contacto con el puerto de salida, el aire comprimido fluye de vuelta a la carcasa desde el lado de presión. Posteriormente, tiene lugar una compresión adicional cuando el volumen de la cámara de compresión disminuye aún más con la rotación continua. En consecuencia, la compresión tiene lugar contra la contrapresión total, lo que resulta en una baja eficiencia y un alto nivel sonoro (mundocompresor.com, 2019).

Dos rotores contra rotativos idénticos, normalmente simétricos, actúan en una carcasa, sincronizados por medio de un juego de ruedas dentadas. Las soplantes se refrigeran normalmente con aire y son exentas de aceite. Por su baja eficiencia, estas soplantes están limitadas a aplicaciones de muy baja presión y a la compresión en una etapa, aunque existen

versiones de dos y tres etapas. Las soplantes Roots se usan frecuentemente como bombas de vacío y para transporte neumático (KAESER Compresores, S.L.).



*Figura 14. Soplante Roots SM impulsor único de una etapa (Mattei Compressed Air Since 1919, 2015); (KAESER Compresores, S.L.).*

#### **2.4.1.2. Compresores dinámicos.**

Este tipo de compresores están disponibles en diseño axial y radial. Se les llama normalmente turbocompresores. Los que tienen diseño radial se denominan compresores centrífugos. Los compresores dinámicos funcionan a presión constante, a diferencia, por ejemplo, de los compresores de desplazamiento, que funcionan con un caudal constante. El rendimiento de un compresor dinámico se ve afectado por las condiciones externas. Por ejemplo, un cambio en la temperatura de entrada tiene como consecuencia un cambio de la capacidad.

##### **2.4.1.2.1. Compresores centrífugos.**

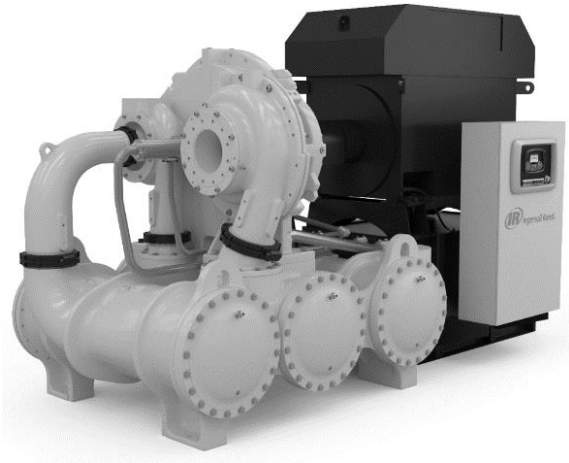
(Atlas Copco Airpower NV, 2015) Menciona que un compresor centrífugo se caracteriza por su flujo de descarga radial. El aire entra por el centro de un rodete dotado de álabes radiales y es impulsado hacia su perímetro por las fuerzas centrífugas. El movimiento radial del aire

genera, simultáneamente, un aumento de la presión y energía cinética. Antes de ser dirigido al centro del rodete de la siguiente etapa de compresión, el aire pasa por un difusor y una carcasa espiral donde la energía cinética se convierte en presión.

Cada etapa ocupa una parte del aumento de presión general de la unidad del compresor. Aunque la relación de presiones por etapa es baja, se utiliza un gran número de etapas y/o varios compresores en serie para obtener la presión de salida deseada. Para aplicaciones de compresión de aire, se integra una caja de engranajes de alta velocidad en las etapas del compresor para hacer girar los rodets en piñones de alta velocidad. El rodete puede tener un diseño abierto o cerrado. El abierto es el más utilizado para aplicaciones de aire de alta velocidad. La velocidad del eje del rodete es muy alta comparada con la de otros tipos de compresor (Nakazawa, Irino, Sakawaki, & Ohyama, 2018). Esto significa que la sujeción del eje del compresor de alta velocidad se realiza con cojinetes de fricción lisos y film de aceite en lugar de rodamientos. Alternativamente, se pueden usar rodamientos de película de aire o rodamientos magnéticos activos para obtener una máquina completamente exenta de aceite. Se montan dos rodets en cada extremo de un eje común para compensar las cargas axiales producidas por las diferencias de presión. Normalmente se usan 2 o 3 etapas con refrigeradores intermedios para aplicaciones de aire comprimido estándar.

En una configuración moderna del compresor de aire centrífugo, se usan motores eléctricos de ultra alta velocidad para accionar los rodets directamente, figura 2.15. Con esta tecnología se crea un compresor compacto sin caja de engranajes ni el correspondiente sistema de aceite de lubricación, obteniendo así un diseño de compresor completamente exento de aceite. Cada compresor centrífugo se debe sellar de forma adecuada para reducir las fugas entre

el eje y la carcasa. Los tipos más comunes son los sellos de laberinto, los sellos de anillo o sellos de holgura controlada (normalmente sellos de grafito) y sellos mecánicos.



*Figura 15. Compresor centrífugo de aire Centac C1000 (Ingersoll Rand, 2019).*

#### **2.4.1.2.2. Compresores axiales.**

Estos compresores tienen un flujo central, consisten en un rotor con múltiples filas de cuchillas y un estator correspondiente con filas de paletas estacionarias, figura 2.16. Las cuchillas giratorias imparten energía de velocidad, principalmente en un plano axial. Las paletas estacionarias actúan entonces como un difusor para convertir la energía de la velocidad residual en energía de presión (U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003). Este tipo de compresor está restringido a capacidades de flujo muy altas y generalmente tiene una compresión relativamente alta eficiencia. Los compresores de flujo mixto tienen impulsores y rotores que combinan las características de los compresores axiales y centrífugos ( Atlas Copco, 2019).



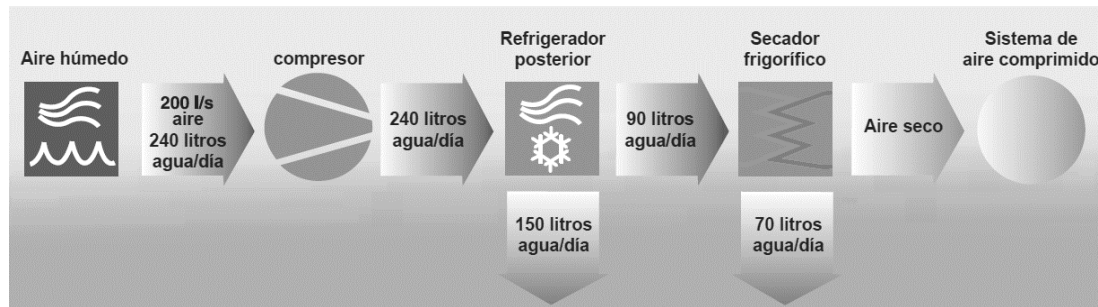


Figura 16. Compresor axial (Atlas Copco, 2019).

#### 2.4.2. Secado del aire comprimido.

El aire atmosférico contiene más vapor de agua a altas temperaturas y menos a temperaturas más bajas. Cuando el aire se comprime, aumenta la concentración de agua. Por ejemplo, un compresor con una presión de trabajo de 7 bar y una capacidad de 200 l/s que comprime aire a 20°C con una humedad relativa del 80% liberará 10 litros de agua por hora en la línea de aire comprimido. Para evitar problemas y perturbaciones debido a la precipitación de agua en las tuberías y en los equipos conectados, el aire comprimido se debe secar. Esta operación se realiza con un refrigerador posterior y un secador, figura 2,17 (European Commission, 2009) (DoE, U. S., 1998).

Para describir el contenido de agua en el aire comprimido se emplea el término “punto de rocío a presión” (PRP). Se trata de la temperatura a la que el vapor de agua comienza a condensarse. Un punto de rocío bajo indica un contenido pequeño de vapor de agua en el aire comprimido, figura 2.18.

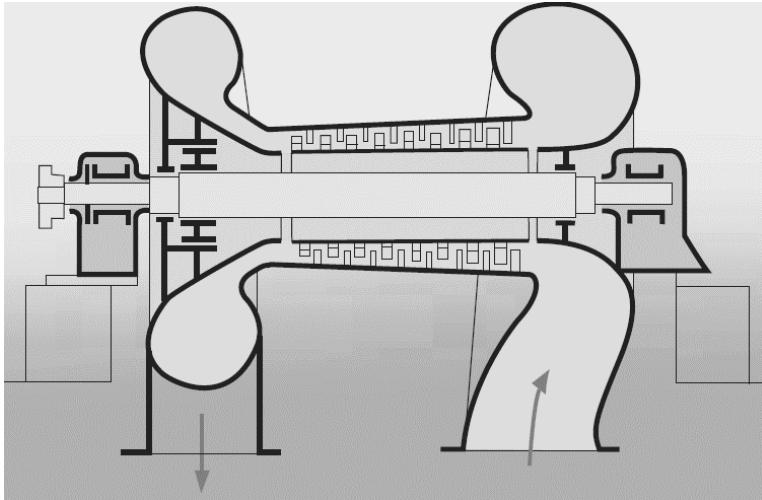


Figura 17. Los problemas debido a la precipitación de agua en las tuberías y los equipos se pueden evitar con un refrigerador posterior y un secador (Atlas Copco Airpower NV, 2015) (European Commission, 2009)

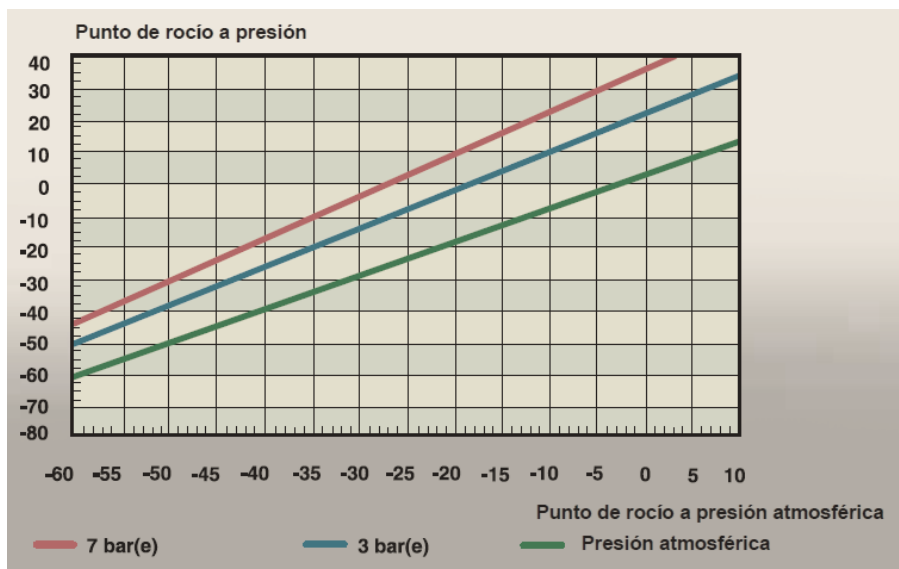


Figura 18. Relación entre punto de rocío y punto de rocío a presión (Kaeser compresores, 2017).

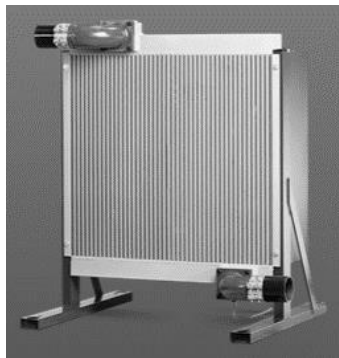
Es importante recordar que el punto de rocío atmosférico no se puede comparar con el PRP al cotejar secadores diferentes. Por ejemplo, un PRP de  $+2^{\circ}\text{C}$  a 7 bar equivale a  $-23^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica. No se pueden usar filtros para eliminarla humedad (reducir el punto de rocío). Esto se debe a que un enfriamiento adicional provoca una precipitación continua de agua de condensación. La selección del equipo de secado depende del punto de rocío a presión. Desde

el punto de vista económico, cuanto menor sea el punto de rocío necesario, mayores serán los costes de inversión y operativos del secador. Existen cinco técnicas para eliminar la humedad del aire comprimido: refrigeración más separación, sobre compresión, membranas, absorción y adsorción (Atlas Copco Airpower NV, 2015).

#### **2.4.2.1. Refrigerador posterior.**

Un refrigerador posterior según (Atlas Copco Airpower NV, 2015) (DoE, U. S., 1998) (Kaeser Compressors, 2019) es un intercambiador de calor que enfría el aire comprimido caliente para precipitar el agua que, en caso contrario, se condensaría en las tuberías, figura 2,19. Puede ser enfriado por agua o por aire, está dotado generalmente de un separador de humedad con purgador automático y se debe colocar junto al compresor.

Aproximadamente el 80–90% del agua de condensación precipitada se recoge en el separador de humedad del refrigerador posterior. Un valor común de la temperatura del aire comprimido después de pasar por el refrigerador posterior es aprox. 10°C por encima de la temperatura del refrigerante, pero puede variar en función del tipo de refrigerador. Se emplea un refrigerador posterior prácticamente en todas las instalaciones estacionarias. En la mayoría de los compresores modernos llevan integrado un refrigerador posterior.



*Figura 19. Refrigerador/ intercambiador de calor para soplantes Kaeser (Kaeser Compressores, 2019)*

#### **2.4.2.2. Secador frigorífico.**

El aire atmosférico contiene humedad. Resultado del proceso de compresión, se genera condensado y el aire comprimido se satura (Ceccato Aria Compressa, 2019), con este método el aire comprimido se enfría, lo que permite que una gran cantidad de agua se condense y se separe. Después de enfriarse y condensarse, el aire comprimido se vuelve a calentar hasta aproximadamente la temperatura ambiente para que no se forme condensación en el exterior de las tuberías. Este intercambio de calor entre el aire comprimido de entrada y de salida también reduce la temperatura del primero, figura 2,20, lo cual hace que disminuya la capacidad de refrigeración necesaria del circuito de refrigerante (Atlas Copco, 2019). El enfriamiento del aire comprimido tiene lugar a través de un sistema cerrado de refrigerante.

El control del compresor de refrigerante mediante algoritmos inteligentes puede reducir significativamente el consumo de energía de los secadores frigoríficos modernos. Los secadores frigoríficos se utilizan para puntos de rocío de entre +2°C y +10°C y tienen un límite inferior, que es el punto de congelación del agua condensada. Están disponibles como unidades independientes o como módulo de secado integrado dentro del compresor.

Los modernos secadores frigoríficos utilizan gases refrigerantes con un bajo potencial de calentamiento global (PCG), lo cual significa que, en caso de liberarse accidentalmente a la atmósfera, contribuyen menos al calentamiento global. Los refrigerantes futuros tendrán un valor PCG aún más bajo, según lo estipulado por la legislación medioambiental.

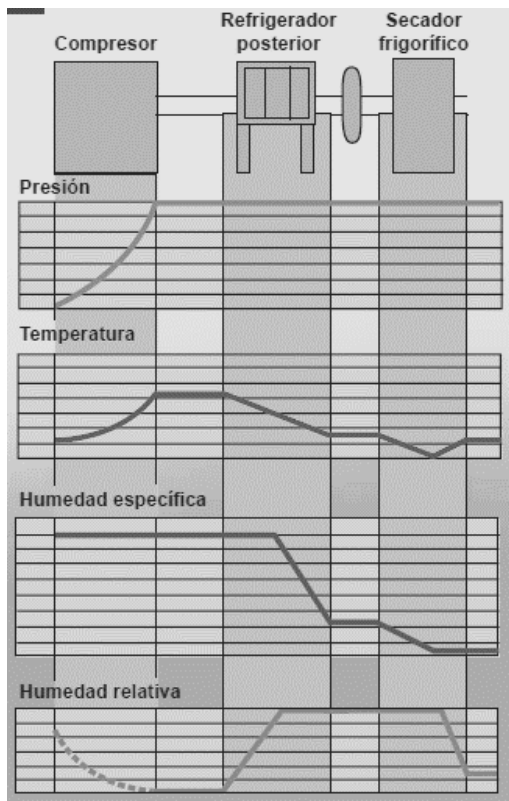


Figura 20. Cambios típicos de los parámetros con la compresión, la refrigeración posterior y el secado con refrigerante (Atlas Copco Airpower NV, 2015).

#### 2.4.2.3. Sobrecompresión.

La sobrecompresión es quizás el método más sencillo para secar el aire comprimido.

El aire se comprime a una presión superior a la presión de trabajo prevista, lo cual hace que aumente la concentración de vapor de agua. Después, el aire se enfría y como resultado se separa el agua. Finalmente, se permite que el aire se propague a la presión de trabajo y se obtiene un punto de rocío a presión más bajo. Sin embargo, este método sólo resulta adecuado para caudales de aire muy pequeños debido a su elevado consumo de energía.

#### 2.4.2.4. Secado por absorción.

El secado por absorción es un proceso químico que permite que el vapor de agua se fije al material absorbente. El material absorbente puede ser sólido o líquido. En muchos casos se

emplea cloruro sódico y ácido sulfúrico, por lo que se ha de tener en consideración la posibilidad de corrosión. Este método es inusual e implica un alto consumo de material absorbente. El punto de rocío se reduce sólo de forma limitada.

#### 2.4.2.5. Secadores de membrana.

Los secadores de membrana utilizan el proceso de permeabilidad selectiva de los componentes del gas en el aire. El secador es un cilindro que aloja miles de diminutas fibras huecas de polímero con un revestimiento interior. Estas fibras tienen una permeación selectiva para eliminar el vapor de agua, en la figura 2,21 se puede apreciar las partes de este tipo de secador. A medida que el aire comprimido filtrado húmedo entra en el cilindro, el recubrimiento de la membrana permite que el vapor de agua penetre y se deposite entre las fibras, mientras que el aire seco continúa su trayectoria a casi la misma presión que el aire húmedo de entrada. El agua separada se libera a la atmósfera. La separación se produce por la diferencia de presión parcial de un gas entre el interior y el exterior de la fibra hueca.

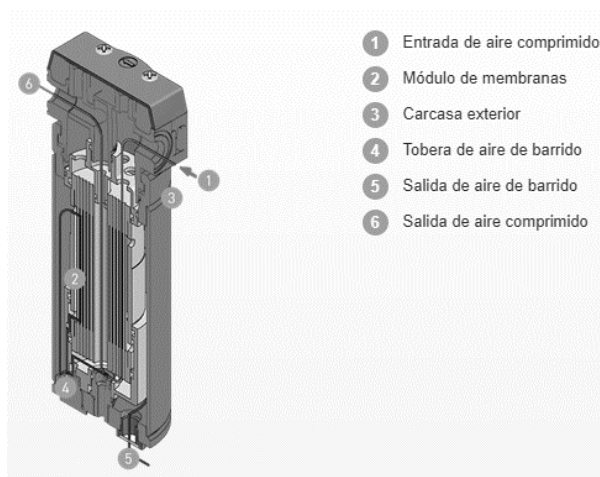


Figura 21. Partes del secador de membrana Kaeser (Kaeser Compresores, 2019).

Los secadores de membrana son fáciles de usar, silenciosos, no tienen piezas móviles, consumen poca energía y precisan un mantenimiento mínimo (principalmente, filtros aguas arriba del secador). Además de eliminar el agua, con una membrana también se pueden separar los componentes de un gas, en función de las características del material de la fibra. La separación de los diferentes componentes se logra por las diferencias de tamaño molecular y la solubilidad del gas en la membrana. Los gases de menor tamaño molecular tienen mayor difusión y se pueden separar fácilmente por la diferencia de movilidad. De esta forma, pueden utilizarse membranas específicas para fabricar generadores de nitrógeno, por ejemplo.

#### **2.4.2.6. Secado por adsorción.**

El principio general de funcionamiento de los secadores de adsorción es simple: el aire húmedo fluye sobre un material higroscópico (silicagel, tamices moleculares, alúmina activada, etc.) y se seca. El intercambio de vapor de agua desde el aire comprimido húmedo al material higroscópico hace que el desecante se sature gradualmente con agua adsorbida. Por lo tanto, el desecante se debe regenerar periódicamente para recuperar su capacidad de secado. Los secadores de adsorción constan generalmente de dos torres de secado: la primera torre seca el aire comprimido de entrada mientras la segunda se regenera, figura 2,22. Cada depósito o torre alterna su función cuando el otro se ha regenerado por completo. El PRP típico que se puede alcanzar es  $-40^{\circ}\text{C}$ , lo cual hace que estos secadores sean idóneos para proporcionar aire muy seco en aplicaciones críticas.



*Figura 22. Secadores de adsorción ADS 1-215 marca Ceccato (Ceccato Airia Compressa, 2019)*

Hay 4 formas diferentes de regenerar el desecante: 1) Secadores de adsorción regenerados por purga (también denominados secadores regenerados en frío), 2) Secadores regenerados por purga caliente, 3) Secadores regenerados por soplante y 4) Secadores reactivados por el calor de la compresión (secadores “HOC”) (DoE, U. S., 1998).

#### **2.4.3. Filtros.**

Producir el aire comprimido con unas condiciones determinadas de sequedad y limpieza es fundamental para que una instalación funcione correctamente y tenga una vida larga. Los filtros se encargan de extraer del aire comprimido circulante todas las impurezas y el agua condensada. Dependiendo del nivel de pureza del aire requerido, se utilizan diferentes niveles de filtración y tipos de filtros (Atlas Copco Airpower NV, 2015). Estos incluyen filtros de partículas para eliminar partículas sólidas, filtros coalescentes para eliminar el lubricante y la humedad, y filtros adsorbentes para sabores y olores.



Teniendo en cuenta la figura 2,23 se puede elegir el grado de tratamiento del aire, teniendo en cuenta que todos los compresores, sin importar el tipo, funcionan como una aspiradora gigante y aspiran impurezas que luego comprimen junto al aire y que llegarán a la red de aire comprimido si no se lleva a cabo el tratamiento correspondiente.

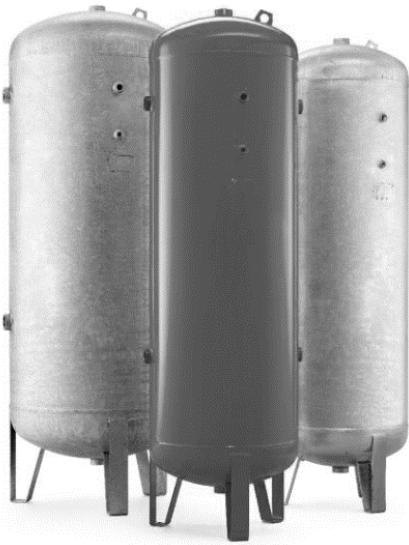
Se recomienda un filtro de partículas después de un secador tipo desecante para eliminar los "finos". Se recomienda un filtro de tipo coalescente antes de un secador tipo desecante para evitar el ensuciamiento del lecho desecante. También puede ser necesaria una filtración adicional para cumplir con los requisitos para usos finales específicos (U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003).

Los filtros de aire comprimido en la corriente del compresor de aire generalmente se requieren para la eliminación de contaminantes, como partículas, condensado y lubricante. La filtración solo al nivel requerido por cada aplicación de aire comprimido minimizará la caída de presión y el consumo de energía resultante. Los elementos también deben reemplazarse según lo indicado por la presión diferencial para minimizar la caída de presión y el consumo de energía, y deben verificarse al menos una vez al año.

Figura 23. Tratamiento del aire comprimido con secador refrigerativos y desecante (Kaeser Compresores, 2015)

#### 2.4.4. Depósitos de aire comprimido.

El compresor y el depósito son dos elementos imprescindibles en toda central compresora y en conjunto son capaces de dar respuesta a la demanda de aire comprimido, que en ocasiones puede ser muy intermitente y variable (DoE, U. S., 1998). El objetivo principal de un depósito de aire comprimido es actuar como almacenamiento temporal para adaptar los picos de demanda del sistema y optimizar la eficiencia de funcionamiento del SAC. Fig. 2.24.



*Figura 2.24. Depósito de aire comprimido marca Ceccato (Ceccato Aria Compressa, 2019)*

Se recomienda tener en cuenta los siguientes factores para dimensionar correctamente los depósitos de aire:

- Minimizar las fluctuaciones y caídas de presión: un depósito de aire se puede utilizar para reducir al mínimo las fluctuaciones de presión que podrían influir en el proceso de producción y en la calidad del producto final.
- Satisfacer a corto plazo las demandas de aire máximas: si la demanda de aire comprimido cambia drásticamente a lo largo del día, es importante tener en cuenta los picos en la

demanda para garantizar que la presión del sistema no caiga por debajo de un nivel aceptable.

- Consideraciones energéticas: utilizar un depósito de aire puede ayudar a reducir el consumo de energía del sistema de aire comprimido al habilitar la carga/descarga de los compresores para operar en un ciclo más largo y con bandas de presión más ajustadas (Kluczek & Olszewski, 2017).
- Consideraciones de seguridad: si es necesario, un depósito de aire puede suministrar aire para que los procesos y sistemas de producción se apaguen de forma segura en una situación de emergencia.

## **2.5. El Sistema de aire comprimido en la producción de oxígeno medicinal.**

Los SAC son uno de los principales componentes que toman parte en la producción de oxígeno medicinal el cual puede obtenerse por licuefacción del aire o por adsorción. El oxígeno por ser un gas medicinal debe cumplir con controles de calidad y trazabilidad, por lo tanto, sus procesos productivos deben contar con procedimientos de calidad auditables. El oxígeno medicinal debe contar con el registro sanitario como producto farmacéutico, el cual exige dossier de producto y respaldo de estudios clínicos que confirmen sus beneficios y aplicaciones (Ministerio de la protección social. República de Colombia, 2009).

En la farmacopea americana (USP 42–NF 37, 2019)(USP) el oxígeno producido por licuefacción debe tener una pureza de 99% y está exento de análisis de CO y CO<sub>2</sub>. En el caso del producido por adsorción, a diferencia del anterior, la USP exige una pureza de 93% y un análisis de las impurezas, estableciendo límites tolerables para el organismo humano, los cuales consisten en que no debe exceder de un máximo de 300ppm de CO<sub>2</sub> y de 10 ppm de CO. La farmacopea europea (Council of Europe, 2017) define como oxígeno medicinal sólo aquel que ha sido

obtenido por proceso de licuefacción del aire, el que debe cumplir con un mínimo de pureza de 99,5 %, pero también exige el cumplimiento del control de impurezas con los siguientes niveles de tolerancia: máximo de 300 ppm de CO<sub>2</sub> y 5 ppm de CO. A este control se suma el análisis de humedad que determina un máximo de 67 ppm (Ministerio de la protección social. República de Colombia, 2009).

### **2.5.1. Producción de Oxígeno mediante el Sistema Criogénico**

El mercado actual de oxígeno medicinal en Colombia está compuesto principalmente por Agafano, del grupo Linde de Alemania con la mayoría del mercado; Oxígenos de Colombia, del grupo Praxair de Estados Unidos y Cryogas del grupo BOC de Inglaterra. La participación de la Empresa Nacional Colombiana de Gas (Cogas), de reciente aparición en el mercado tiene producción mínima y opera con una planta muy pequeña ubicada en la ciudad de Bogotá.

Estas empresas proveedoras de gases medicinales en cilindros, utilizan para su producción el sistema criogénico, que consiste en separar el oxígeno del nitrógeno y los otros gases que integran el aire. Reduciendo la temperatura a  $-200^{\circ}\text{C}$ , para lograr la licuefacción del aire, posteriormente es sometido a destilación logrando así la separación de sus componentes en virtud de sus diferentes puntos de ebullición (Presidencia de la república de Colombia, 1995).

El oxígeno así obtenido tiene una concentración nominal de 99,5% y está exento de contaminantes que puedan ser perjudiciales para la salud. El oxígeno líquido se puede gasificar y envasar en cilindros a alta presión, 2.250 libras por pulgada cuadrada, que equivalen a 150 bares.<sup>2</sup> También existen cilindros llenados a 2.900 psi, equivalentes a 200 bares.

La producción de oxígeno medicinal por el sistema criogénico, se desarrolla en las siguientes etapas, figura 2.25:

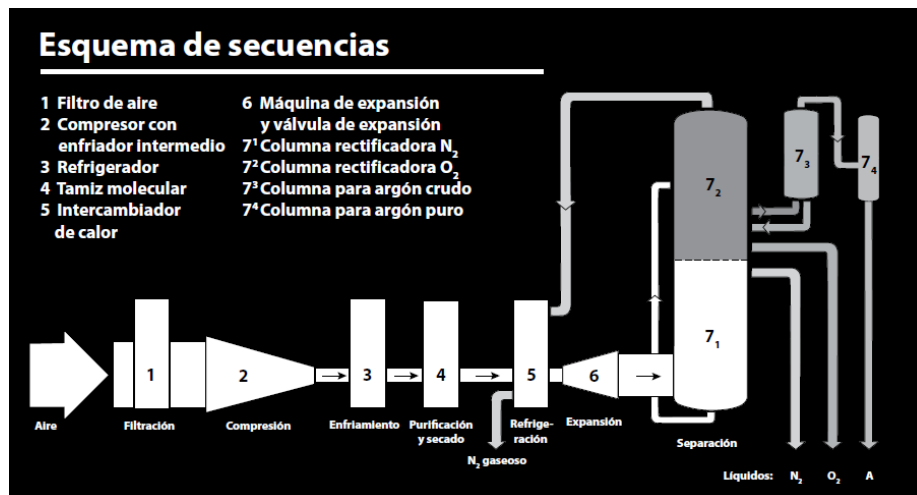


Figura 25. Diagrama de producción de gases medicinales por el sistema criogénico (Aga Fano - Linde Colombia S.A.).

Filtración, Compresión, Enfriamiento, Purificación y secado, Refrigeración, Expansión y licuefacción, Destilación.

El aire atmosférico que es filtrado en el compresor (1), se traslada al compresor (2), donde se somete hasta seis veces la presión atmosférica. El aire es enfriado por medio de agua refrigerada en un intercambiador de calor. En el refrigerador (3) se baja la temperatura hasta  $-5^{\circ}\text{C}$  después de lo cual el vapor de agua, dióxido de carbono e hidrocarburos son separados del aire por medio del tamiz molecular (4) (International electrotechnical commission, 1970).

El aire comprimido y pre-enfriado pasa luego por un intercambiador de calor (5), por una máquina de expansión (6) y por una válvula de expansión con la cual el aire se enfría hasta muy cerca de su punto de condensación, aproximadamente  $-175^{\circ}\text{C}$ .

Esta temperatura es necesaria en el siguiente proceso de separación en la columna (7) y en la producción de los gases en forma líquida.

Los gases se separan del aire por medio de un proceso de destilación con el cual los gases son altamente condensados y vaporizados en las columnas hasta llegar a la concentración que se desee en cada gas. Este proceso se efectúa porque los gases tienen diferentes puntos de

ebullición: oxígeno, 183 °C; argón, 186 °C; nitrógeno, 196 °C. Los gases son almacenados en forma líquida en tanques muy bien aislados (Instituto nacional de vigilancia de medicamentos y alimentos, 1992). El argón puede ser enviado a una Columna de destilación y envasado para utilizarlo en la industria.

### **2.5.2. Producción de Oxígeno mediante un Sistema PSA**

Un sistema PSA de generación de oxígeno consiste en separar el oxígeno de nitrógeno que se encuentra en el aire comprimido, por medio de tamices moleculares, para ser almacenado y transportado por las redes existentes para ser suministrado a las diferentes áreas de consumo, bajo condiciones controladas de pureza y calidad (Ceccato, 2015); (Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación, 1992).

Este proceso tiene 5 grandes etapas, ver figura 2.26:

- Compresión del aire,
- Tratamiento del aire: Secado y filtrado,
- Separación de oxígeno medicinal en las PSA,
- Análisis, registro, regulación, medición y control,
- Alimentación del oxígeno a la red de distribución (Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación, 1992); (Ceccato, 2015).

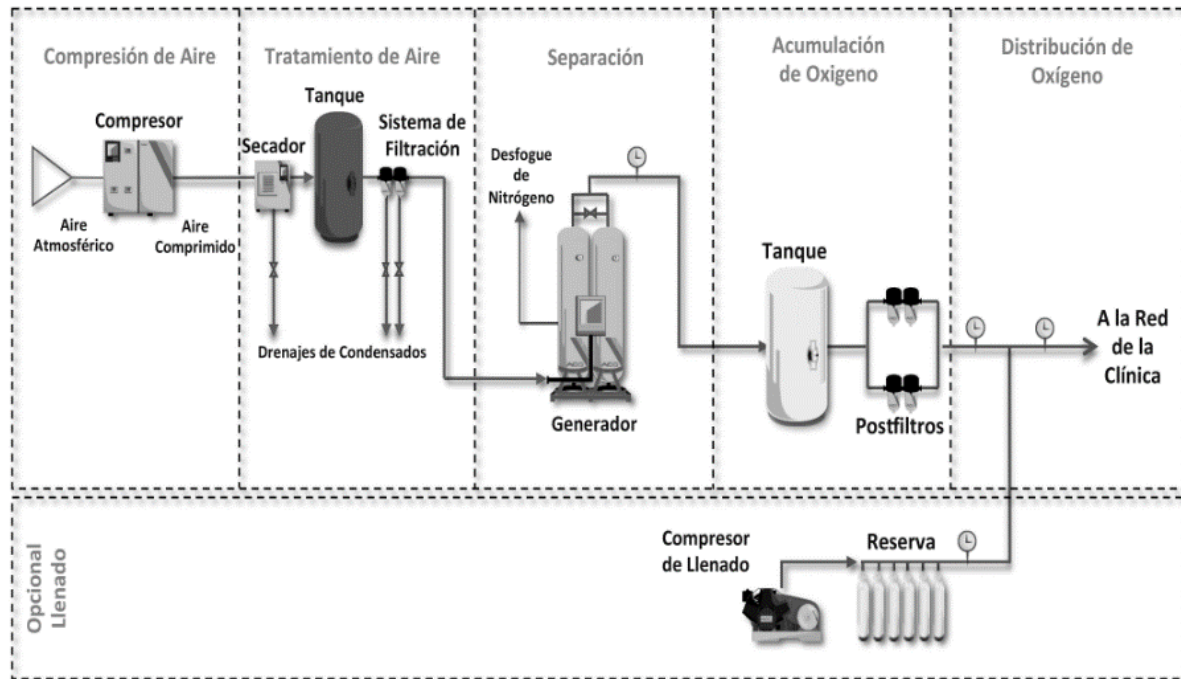


Figura 26. Diagrama del sistema PSA de producción in situ de oxígeno medicinal (America Consulting Group S.A.S, Ing. Rogelio Ortega).

### 2.5.2.1. Compresión del aire

Los compresores de tipo tornillo y lubricados son instalados en salas especialmente acondicionadas, donde por medio de unos ductos succionan el aire atmosférico. Estos compresores cuentan con filtros para eliminar impurezas sólidas de la atmosfera. La compresión del aire atmosférico se encuentra entre 6 y 10 bar.

### 2.5.2.2. Tratamiento del aire comprimido.

El tratamiento del aire comprimido en un sistema PSA se realiza básicamente en tres fases:

- Separación de fases en un recipiente separador (disminuye la velocidad del flujo del aire), con el fin de remover las fases líquidas: agua y aceite.



- Secado refrigerativo que separa la humedad del aire, enfría el aire comprimido a +2 °C, permitiendo la condensación de la humedad y así se puede extraer del sistema en forma líquida.
- Filtración, se efectúa con tres clases de filtros, uno coalescente de remoción de condensado y líquidos al 99,99%; un filtro extrafino de aceite, retiene partículas de aceite en un 99,999%; un filtro de carbón activado que retiene partículas volátiles y olores.

#### **2.5.2.3. Separación de oxígeno medicinal en las PSA**

La planta consta de tres PSA y en cada una entra el aire con su composición normal y es transformado en oxígeno del 93% ( $\pm 3\%$ ) de concentración. El nitrógeno sobrante es expulsado a la atmósfera.

Cada PSA tiene en la salida una válvula de tres vías que permite descargar a la atmósfera (oxígeno de menos del 90%), y un analizador paramagnético, que mide la concentración del oxígeno medicinal. Existe un tercer analizador a la salida de las tres PSA antes de entregar el oxígeno en la red (Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación, 1992).

Las PSA utilizan zeolitas que constituyen un “tamiz molecular”. La adsorción es la retención por afinidad física (sin reacción química) en la superficie de un cuerpo, de las moléculas o iones de otro elemento. Las zeolitas adsorben el nitrógeno N<sub>2</sub> y otros gases del aire que son expulsados a la atmósfera.

En la absorción no hay afinidad, la retención se genera por características estructurales del otro elemento, por ejemplo, la esponja que absorbe el agua. El tamiz molecular de la PSA adsorbe selectivamente el nitrógeno y permite el paso del oxígeno, el cual, a su vez, es almacenado en los tanques pulmón (Ceccato, 2015).

El primer lecho es entonces sometido a la des adsorción del nitrógeno por medio de la despresurización del recipiente. La concentración del oxígeno está en el rango de 90% a 96%. La generación de oxígeno medicinal exige un filtro esterilizante. Con mantenimiento, el tamiz molecular tiene una vida indefinida.

#### **2.5.2.4. Análisis, registro, regulación, medición y control**

En el sistema PSA se debe realizar medición y recopilación in situ de los datos necesarios para calcular los costes de energía real y de producción. Además, identificar, medir y evaluar las pérdidas y fugas de aire comprimido y oxígeno medicinal. Realizar propuestas de mejoras, cambios necesarios y cálculos del ahorro de energía potencial. Posteriormente mantener un seguimiento constante de la optimización energética y una transparencia del consumo de energía (Atlas Copco).

#### **2.5.2.5. Alimentación del oxígeno a la red de distribución**

El sistema PSA debe cumplir con las siguientes exigencias: (1) válvula anti-retorno en la línea de suministro del sistema concentrador de oxígeno. (2) el sistema concentrador de oxígeno tiene un sistema doble de regulación de presión, que provee una presión estable y nominal de 50 psi y con válvulas de alivio de presión diseñadas para abrirse a 75 psi. Es decir el oxígeno debe entrar a la red de distribución con una presión de 50 PSI y una concentración de oxígeno del 93% ( $\pm 3\%$ ) (Ministerio de la protección social. República de Colombia, 2009).

### **2.6. Consumo de energía.**

En el área de la economía y a nivel social, la energía es ante todo un bien muy especial, irremplazable para lograr el bienestar personal y aún más indispensable para desarrollar la

actividad económica y mantener e incrementar la competitividad de un país, una región, un continente o el mundo entero (Martinez-Val, 2013). El consumo de energía según (Castrillon Mendoza, Quispe Oqueña, Gonzales Hinestroza, Urhan Rojas, & Fandiño Gutierrez, 2014), es la cantidad de energía usada en un proceso cualquiera. En las clínicas, se consume energía eléctrica usándola en procesos de soporte administrativo como las tecnologías de la información, en iluminación, en climatización, en el proceso de producción de oxígeno medicinal, entre otros (Hernández Pineda, Carmona Vázquez, Flores Díaz, & Sosa Granados, Manual para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía, 2014).

## **2.7. Eficiencia Energética.**

En (Bunse , Vodicka, Schönsleben, Brülhart, & Ernst, 2011) definen la eficiencia energética como “la relación de los servicios de energía que salen y entran para conseguir el máximo rendimiento de cada unidad de energía comprada”. Y en (Castrillon Mendoza, Quispe Oqueña, Gonzales Hinestroza, Urhan Rojas, & Fandiño Gutierrez, 2014) la definen como “la proporción u otra relación cuantitativa entre el resultado en términos de desempeño, de servicios, de bienes o de energía y la entrada de Energía”.

La eficiencia energética tiene la ventaja de que las medidas para reducir el impacto ambiental generalmente tienen un retorno financiero. El problema a menudo surge del costo-beneficio, y la eficiencia económica de cualquier técnica puede proporcionar información para evaluar el costo-beneficio (Neale & Kamp, 2009). En el caso de las instalaciones existentes, se debe tener en cuenta la viabilidad económica y técnica de su actualización. Incluso el único objetivo de garantizar un alto nivel de protección para el medio ambiente en general implicará hacer juicios de compensación entre diferentes tipos de impacto ambiental, y estos juicios a

menudo estarán influenciados por consideraciones locales. Por ejemplo, en algunos casos, el consumo de energía puede incrementarse para reducir otros impactos ambientales.

(European Commission, 2009) Menciona que la 'Eficiencia energética' es un término que se usa ampliamente de forma cualitativa como medio para abordar diferentes objetivos, como la política a nivel nacional e internacional, así como objetos comerciales, principalmente:

- Reducción de emisiones de carbono (Protección del clima).
- Mejora de la seguridad de los suministros de energía (a través de la producción sostenible).
- Reducción de costes (mejora en la competitividad de las empresas).

## **2.8. Auditoría energética**

Un enfoque sistemático, para controlar el consumo de energía y para localizar fuentes de desperdicio, se conoce como auditoría de energía. Un estudio de auditoría de energía ayuda a una organización a comprender y analizar su uso de la energía e identificar áreas donde se puede reducir el consumo así como (PintoGarcia, Szklo, Schaeffer, & McNeil, 2007) (Capehart, Turner, & Kennedy, 2006), decidir cómo presupuestar el uso de energía, planificar y practicar métodos de conservación de energía factibles que mejoren su eficiencia energética, reducir el desperdicio de energía y reducir sustancialmente los costos de energía.

## **2.9. Gestión energética.**

Constantemente las organizaciones buscan mejorar su gestión en general, y para ello, establecen estrategias para aumentar y mejorar su eficiencia, a la vez que se reducen costos. El enfoque puede hacerse en el servicio, los insumos, las ventas, la estructura o en las personas. Actualmente, muchas empresas están gestionando sobre sus insumos estratégicos, como por

ejemplo la energía, procurando producir más con menos o reducir sus consumos y costos de energía. Algunas optan por hacerlo de una forma estructurada y sistemática, mientras otras pueden hacerlo a partir de resultados de asesorías como auditorías energéticas o bien la detección de mejoras desde dentro de la organización (Bunse , Vodicka, Schönsleben, Brühlhart, & Ernst, 2011).

Después de un intenso trabajo, entre los años 2005 y 2011, para la creación de un estándar mundial en sistemas de gestión de la energía por parte de la Organización Internacional de Normalización (ISO) se aprueba en el año 2011 la ISO 50001 donde se recoge la experiencia de diversos modelos internacionales como los explicados a continuación, ver figura 2.27 y se sintetizan sus principales características para lograr un Sistema de Gestión de la Energía (SGE) exitoso y aplicable a cualquier tipo de organización:

- ANSI/MSE 2000:2008 – Sistema de Gestión para la Energía (American National Standards Institute). El Instituto de Tecnología de Georgia creó en el año 2000 el primer estándar integral de gestión de energía compatible con ANSI para las empresas e industria. Este estándar surgió como solución a la dificultad que tenían las empresas en administrar correctamente la energía tras la implementación de medidas técnicas o cambios tecnológicos, ya que estas soluciones no eran suficientemente eficaces. El estándar ANSI/MSE 2000:2008 permite a las empresas que lo implantan voluntariamente garantizar un ahorro de energía, una mejora continua o la creación de un plan de gestión estratégico de energía.
- DS 2403:2001 Gestión de la Energía – Especificación (Danish Standards Association). En Europa, Dinamarca se considera un país pionero en gestión energética. En el año 2000, a partir de una iniciativa común de la Confederación

Danesa de Industria, la Federación Danesa de PYMES, la Agencia Danesa de la Energía, diversas instituciones científicas, así como otros participantes redactaron la primera norma nacional. En 2001, la asociación danesa de estándares (DS) publicó el estándar nacional DS 2403:2001. Para llevar a cabo la implementación y certificación de este sistema de gestión energética eran necesarios una serie de acuerdos voluntarios entre el gobierno y la industria. Esta norma se derogó el 13 de agosto de 2008.

- SS 627750:2003 – Especificación con Guía para su Uso. (SIS, Sedes Standards Institute). Suecia implementó en 2003 esta norma nacional que permitía a las empresas incluir sistemáticamente aspectos energéticos en las decisiones de la compañía para lograr un uso eficiente de la energía. En 2005, el gobierno sueco creó un plan de apoyo a las empresas que implantaban este sistema de gestión energético certificado, eliminando las tasas de la energía que consumían.
- I.S. 393:2005 Sistemas de Gestión de Energía – Requisitos y Guía para su Uso (NSAI, National Standards Authority of Ireland). Esta norma fue desarrollada para asegurar que las empresas integrasen la gestión energética en sus estrategias de negocio. Su aplicación proporciona a las organizaciones un enfoque estratégico, que, apoyado por el compromiso de la alta dirección, se traduce en una mejora continua de la gestión de la energía. Esta norma comparte principios comunes con la norma ISO 14001.
- UNE 216301:2007 “Sistemas de Gestión de la Energía. Requisitos”. (AENOR, Agencia Española de Normalización y Certificación). Publicada en 2007 fue la norma pionera en gestión energética. En este caso, las empresas que decidían implantarla no

recibían ayudas, siendo el ahorro experimentado por la reducción de consumo energético el principal beneficio que obtenían. Esta norma fue anulada por la norma europea EN 16001:2009.

- EN 16001:2009 “Sistemas de gestión energética. Requisitos con orientación para su uso”. La norma europea EN 16001 entró en vigor en julio del 2009. Era una norma especialmente relevante para aquellas organizaciones que operaban en una industria con un consumo intensivo de energía o ante legislaciones sobre emisiones de gases de efecto invernadero. Ésta presentaba ya una estructura muy similar a la actual ISO 50001 y fue finalmente derogada en noviembre de 2011.

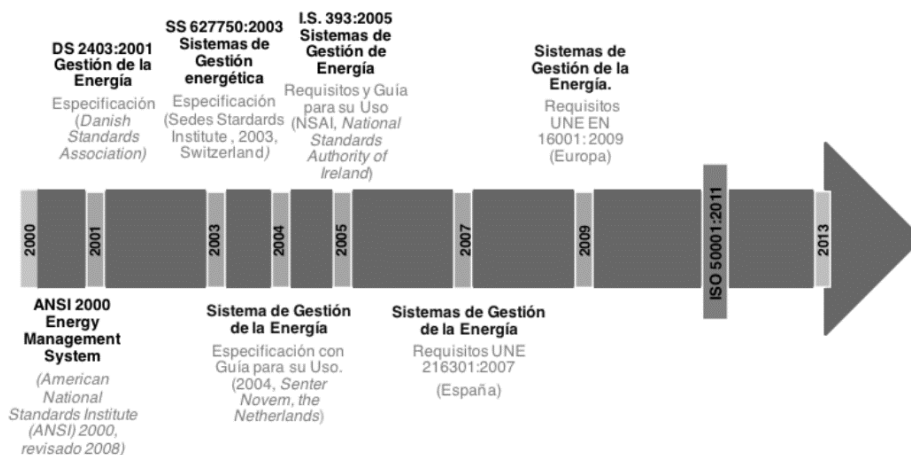


Figura 27. Estándares nacionales para la implantación de SGE (Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN), 2014).

## 2.10. Norma INTE/ISO 50001:2011

La (ISO 50001:2011, IDT, 2015) menciona que esta norma ofrece beneficios para las organizaciones grandes y pequeñas, en los sectores público y privado, en la producción y los servicios, independientemente de sus condiciones geográficas, culturales o sociales, el éxito de su implementación depende de los compromisos adquiridos por todos los implicados y

especialmente de la alta dirección.. Asimismo, de los costos económicos de la energía para una organización, la energía puede atribuir costos ambientales y sociales por el agotamiento de los recursos y contribuir a problemas tales como el cambio climático.

Proporciona un marco de requisitos que permite a las organizaciones desarrollar una política para un uso más eficiente de la energía, fijar metas y objetivos para cumplir con la política, utilizar los datos para entender mejor y tomar decisiones sobre el uso de energía, medir los resultados, revisar la eficacia de la política y mejorar continuamente la gestión de la energía (Szajdzicki, 2017).

Esta norma internacional se basa en el ciclo de mejora continua; Planificar- Hacer- Verificar- Actuar (Szajdzicki, 2017); (Correa Soto, y otros, Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011, 2014), como se muestra en la figura 2.28 y los ciclos que la conforman pueden resumirse de la siguiente forma:

- Planificar: llevar a cabo la revisión energética y establecer la línea de base, los indicadores de desempeño energético (IDEn), los objetivos, las metas y los planes de acción necesarios para lograr los resultados que mejorarán el desempeño energético de acuerdo con la política energética de la organización.
- Hacer: implementar los planes de acción de gestión de la energía.
- Verificar: realizar el seguimiento y la medición de los procesos y de las características clave de las operaciones que determinan el desempeño energético en relación a las políticas y objetivos energéticos e informar sobre los resultados.
- Actuar: Tomar acciones para mejorar continuamente el desempeño energético y el SGE en base a los resultados.



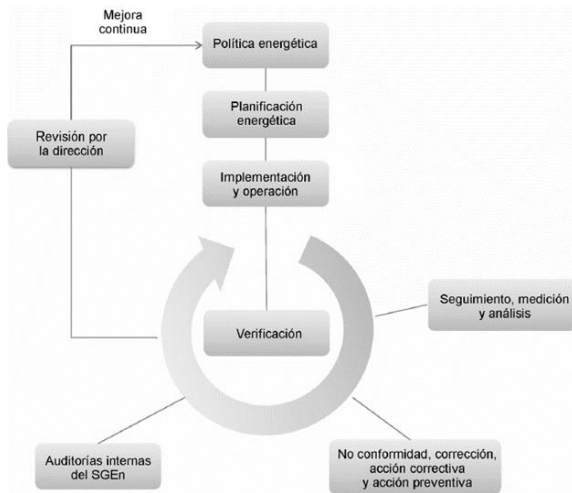


Figura 28. Modelo de gestión de la energía (ISO 50001:2011, IDT, 2015).

### 2.11. Sistema de la Gestión de la Energía y requisitos.

La norma (ISO 50001:2011, IDT, 2015) define un Sistema de Gestión de la Energía (SGE) como una metodología para lograr el objetivo principal de establecer requisitos mínimos y específicos que garanticen la mejora continua del desempeño energético de la organización que la adopte. El cumplimiento de estos requisitos conduce a la organización a buscar continuamente la reducción de su consumo de energía, aumentando la eficiencia energética de sus procesos e identificando la mejor y más adecuada forma de uso de la energía necesaria para viabilizar sus actividades. La efectividad de un SGen dependerá, en gran medida, del compromiso y disponibilidad de todos los actores involucrados en la organización para gestionar el uso y el costo de la energía, además de realizar los cambios que sean necesarios en el día a día para facilitar estas mejoras y la reducción en los costos.

Uno de los aspectos más importantes para implementar un Sistema de Gestión de la Energía en una empresa del sector salud, es el compromiso de la alta dirección para realizar la implementación, mantenimiento y mejora continua de los requisitos contemplados en la norma NTC-ISO 50001. Además, que disponga de los recursos necesarios y que defina claramente los

roles y responsabilidades de los actores del SGE. La alta dirección también ha de designar un representante suyo con autoridad y responsabilidad para asegurar que el SGE se establezca, se mantenga y se mejore de forma continua de acuerdo con los requisitos de esta norma.

Para implementar un SGE, es necesario que la organización realice y documente un proceso de planificación energética, en la que se debe tener en cuenta diversos aspectos relacionados con el uso y consumo energético en la institución. Esta deberá ser coherente con la política energética definida previamente y conducir de manera continua a la mejora del desempeño energético.

El primer paso en el proceso de planificación, es la identificación de los requisitos en materia energética que le aplican, pueden ser legales u otro tipo que la organización haya suscrito. Se debe tener acceso a los mismos, se debe determinar cómo se van a aplicar y asegurar que se tendrán en cuenta en las diferentes etapas de la implementación del SGE.

En un segundo paso, la organización debe llevar a cabo una revisión energética la cual debe ser documentada de manera física o digital. Debe analizarse y conocerse el pasado y presente de los consumos energéticos, basándose para ello en mediciones y otros datos con el objetivo de conocer las áreas de mayor consumo. Se deben identificar los aspectos que influyen en estos consumos y la necesidad de realizar un diagnóstico energético enfocado en la optimización del sistema. Debe haber un control de la documentación, para asegurar que los documentos utilizados sean vigentes y no obsoletos.

Los beneficios asociados a la implementación de un SGE eficaz se presentan a continuación (Hernández Pineda, Carmona Vázquez, Flores Díaz, & Sosa Granados, Manual para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía., 2014):

- Ayuda a identificar, priorizar y seleccionar las acciones para la mejora del desempeño energético, con base en su potencial de ahorro y el nivel de inversión requerido.
- Reduce costos al aprovechar al máximo los recursos energéticos.
- Impulsa la productividad y el crecimiento (mayor aprovechamiento, menor desperdicio).
- Promueve las mejores prácticas de gestión energética.
- Asegura la confianza y calidad de la información que se utiliza para la toma de decisiones.
- Facilita la integración de sistemas de gestión ya existentes.
- Genera una cultura organizacional orientada a la gestión de la energía.

## **2.12. Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido.**

El Aire comprimido es un alto consumidor de energía y normalmente es olvidado en los programas de ahorro de energía de las distintas instituciones. De hecho, el sistema de aire comprimido representa el 8% de la energía que usa el sector industrial colombiano. Sin embargo, en muchas industrias de diferentes sectores, incluyendo el de la salud puede ser un gran consumidor de energía. Por lo tanto, las ineficiencias en los sistemas de aire comprimido pueden ser significativas. Luego de mejorar el sistema, el ahorro de energía puede oscilar entre el 12 y el 50 por ciento o más del consumo de electricidad en el SAC. Para muchas instalaciones, esto equivale a miles, o incluso cientos de miles de dólares de ahorros anuales potenciales, según el uso. Un sistema de aire comprimido adecuadamente administrado puede ahorrar energía, reducir el mantenimiento, reducir el tiempo de inactividad, aumentar el rendimiento de la producción y mejorar la calidad del producto (U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2003).

Las oportunidades de ahorro de energía están presentes en todas partes en los sistemas de aire comprimido, solo se necesita un esfuerzo mínimo para reconocer dónde se puede ahorrar energía (Dindorf, Energy savings opportunities in compressed air systems (in Polish), 2010); (Dindorf, Estimating potential energy savings in compressed air systems, 2012). Sin embargo, se requieren esfuerzos concertados para garantizar que estos ahorros de energía se puedan mantener. Con el aumento de los precios mundiales del petróleo crudo, se espera que los costos de energía aumenten. También hay preocupaciones ambientales con respecto a liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Menos energía consumida significa menos emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que está dañando el medio ambiente en que vivimos.

Los ahorros de energía en los sistemas de aire comprimido son posibles en la producción y tratamiento del aire comprimido, redes de aire comprimido, dispositivos de uso final, diseño y operación general del sistema.

En el sistema de aire comprimido existen posibilidades potenciales de disminución del desperdicio de energía:

- Aumentar el diámetro de las tuberías; reducir la longitud de la red (12%).
- Reparar las fugas periódicamente: del 15 al 50% de la producción de aire fluye a través de las fugas.
- Instalar un sistema con varios valores de presión (sistemas o redes de presión múltiple), separados o conectados entre sí (con el uso de compresores locales sobre compresores). La reducción de la presión de 1 bar proporciona un ahorro de energía del 8%.
- El 85- 95% de la energía de entrada de un compresor se pierde como calor, por tanto, este calor puede ser aprovechado. Por ejemplo, en instalaciones en las que hay necesidad

de agua caliente (CO- EFFICIENT, 2013). En la práctica, el 76% de este calor puede recuperarse y utilizarse (Kaeser compresores, 2017).

- Instalar un control automático de la producción de aire comprimido a través de un compresor de velocidad variable o un control automático de todos los compresores según las necesidades. Ahorro promedio con un control automático (del 5 al 35%).
- Reducir la temperatura de entrada del aire: se obtiene un ahorro de consumo del 1% cada 3 grados.
- Usar trampas de condensado “sin pérdidas de fugas”. Una red de alto rendimiento permite una pérdida de presión máxima del 10% en toda la línea.
- Mejorar y verificar el correcto funcionamiento de las válvulas reguladoras de presión, filtros, lubricadores, secadores y trampas de condensado (2%).
- Diseñar adecuadamente las capacidades de almacenamiento para permitir la operación con una mayor salida de compresores y para evitar la activación o desactivación inesperadas.

### **2.13. La auditoría energética en los sistemas de aire comprimido.**

Con el fin de aumentar la eficiencia energética y reducir costes de producción se ha creado la ISO 50001. Parte del cumplimiento de esta norma pasa necesariamente por el control del aire comprimido, ya que es uno de los factores que más gasto energético produce en las empresas.

Por otro lado, la ISO 11011 es una directriz internacional que estipula el método a seguir para la correcta realización de una auditoría de aire comprimido. La aplicación de estas normas en las empresas aporta grandes ahorros económicos y es una gran contribución al medio ambiente. La norma plantea un modelo de cuatro etapas: política energética, planeación

energética, implementación y verificación insertadas en un ciclo de mejora continua (Correa Soto, y otros, Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011, 2014).

La etapa de planificación energética y las acciones que la componen se consideran el núcleo del SGE. Esta etapa sienta las bases para el desarrollo de las estrategias de mejora del desempeño energético de las organizaciones, definiendo los objetivos específicos alcanzables y estableciendo las medidas para su cumplimiento. En la figura 2.29 se esquematiza esta etapa.

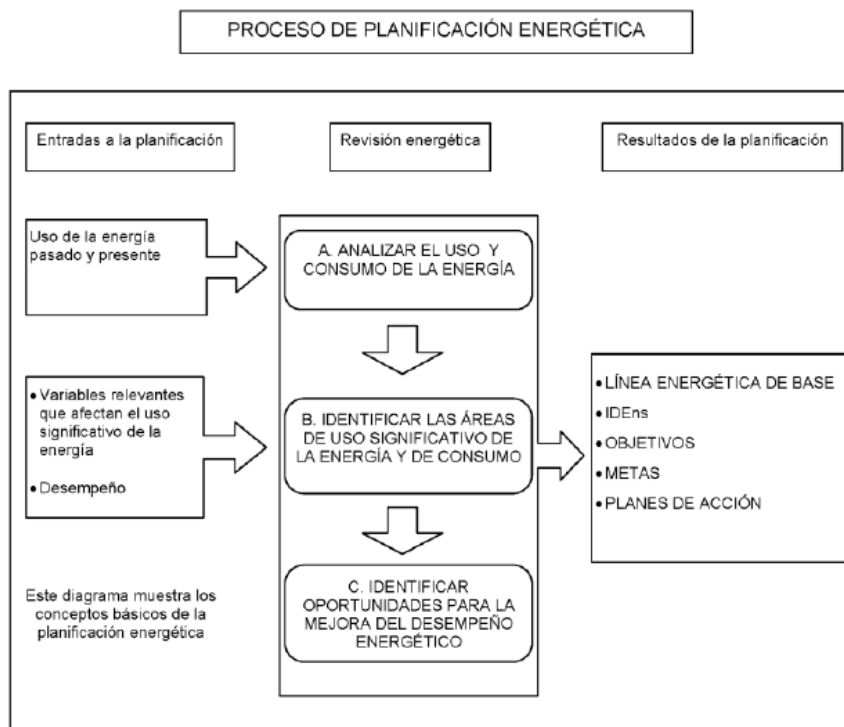


Figura 29. Planificación energética (ISO 50001:2011, IDT, 2015).

Siguiendo las directrices con lo establecido por la norma ISO 50001 (ISO 50001:2011, IDT, 2015), la metodología seguida en esta investigación consta de 4 pasos:

1. Analizar: medición y recopilación in situ de los datos necesarios para calcular los costes de energía reales. Determinar los puntos críticos y evaluar el ahorro de energía alcanzable.

2. Localizar: identificar, medir y evaluar las pérdidas en el sistema de aire comprimido.
3. Recomendaciones: propuestas de mejoras y cambios necesarios. Calculo del ahorro de energía potencial.
4. Control: mantener un seguimiento constante de la optimización energética y una transparencia del consumo de energía.

### **Capítulo 3 Implementación de la metodología y análisis de los resultados.**

A continuación, se evaluará el estado actual de los equipos que conforman el sistema de aire comprimido y el sistema PSA ubicado en una clínica privada de alta complejidad de la ciudad de barranquilla, se desarrollan los diferentes escenarios experimentales y cálculos pertinentes para presentar los resultados obtenidos y se plantearán recomendaciones para mejorar la eficiencia energética en el sistema.

#### **3.1. Descripción de la instalación.**

El estudio se desarrolló en una clínica de alta complejidad de la ciudad de Barranquilla, la cual tiene un consumo mensual de  $59.000\text{m}^3$  de oxígeno medicinal, con un consumo promedio mensual de energía eléctrica que está en el orden de los 628 MWh y la facturación alcanza valores superiores de 190.000.000 COP.

Esta clínica está dividida en dos áreas fundamentales; El área administrativa y el área servicios que está subdividida en las sub-áreas de urgencia adulto y pediátrica, unidad transfusional, unidad de cardiología clínica, uci pediátrica y adulto, radioterapia conformacional, convencional y MIT, quimioterapia, ortopedia, neurocirugía, medicina del dolor y cuidados paliativos, laboratorio clínico especializado, imagenología, hospitalización general, hospitalización alta complejidad hemato-oncológica, hemodinámica, ginecología, cirugías de mayor y menor complejidad, central de mezclas y braquiterapia, donde en la mayoría de estas sub-áreas utilizan aire, vacío y oxígeno medicinal producido mediante un sistema PSA que separa el oxígeno del nitrógeno que se encuentra en el aire comprimido; este sistema completo consume gran cantidad de energía eléctrica y es donde se centra esta investigación.



### **3.2. Tecnología utilizada.**

#### **3.2.1. Monitores de electricidad Eyedro.**

Los monitores de electricidad disponen de la más alta tecnología, miden una gran variedad de parámetros eléctricos, con el principal objetivo de obtener el control y la gestión de una instalación, máquina, industria, etcétera, permitiendo optimizar al máximo los costes energéticos. Estos presentan unas ventajas que se mencionan a continuación:

- Permiten descubrir el consumo y la demanda pico de energía.
- Identificar desperdicios y ahorros potenciales.
- Monitoree el consumo de electricidad durante las horas de operación y no operación.
- Monitoree el consumo de electricidad a nivel del edificio, departamento o equipo.
- Los datos se almacenan en un servidor remoto las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 365 días del año.
- Sus datos están disponibles para su revisión desde cualquier lugar donde tenga acceso a Internet
- Gráficos receptivos en tiempo real.
- Datos descargables para su posterior análisis.

En el presente trabajo se utilizaron los monitores de electricidad para medir el consumo de energía de los compresores de la planta PSA además de parámetros eléctricos como la tensión, corriente, potencia, desequilibrio de tensión, fluctuaciones de tensión, eventos transitorios entre otros. A continuación, se presenta las especificaciones de los monitores de electricidad, utilizados para esta investigación:

Tabla 2.  
Especificaciones de los monitores de electricidad Wireless

Descripción	Especificaciones
Tensión de alimentación	5V DC
Corriente de suministro de energía	0~0.3A
Condiciones de operación	32 a 122°F / 80% Humedad relativa
Piezas incluidas	Un (1) módulo de puerta de enlace. Un (1) módulo de sensor. Tres (3) sensores de corriente de 0 a 200A AC 50-60Hz. Un (1) cable Ethernet de 3 pies. Dos (2) adaptadores de corriente.
Enlace inalámbrico	IEEE 802.15.4 2.405 a 2.480 GHz
Alcance inalámbrico	Interior: 500 pies (150 m) Línea de visión: 1000 pies (300 m)

Fuente: Elaboración propia a partir de (Eyedro Green Solutions Inc., 2018)



Figura 30. Monitores de electricidad Wireless Eyedro (Eyedro Green Solutions Inc., 2019).

### 3.2.2. Pinza amperimétrica.

La pinza amperimétrica es un medidor eléctrico que combina un voltímetro con un medidor de corriente tipo pinza, mide cualquier combinación de corriente alterna y directa, tensión en los rangos AC y DC y otros parámetros como la resistencia, prueba de continuidad, etc. Una de las grandes ventajas de la pinza amperimétrica es que permite la medición de

parámetros mencionados anteriormente de forma activa sin la necesidad de interrumpir el circuito que se desea medir. La pinza amperimétrica se empleó para medir parámetros eléctricos como la tensión y corriente además las pérdidas en los conductores. A continuación, se presenta las especificaciones de la pinza amperimétrica, utilizados para esta investigación:

*Tabla 3.*  
*Especificaciones de la pinza amperimétrica modelo PM2016A*

Magnitud	Rango de medida	Precisión
AC Voltaje	1.0~600V	$\pm(0.8\%+5)$
DC Voltaje	0~600V	$\pm(0.5\% +3)$
AC Corriente	10mA~200A	$\pm(2.5\%+5)$
Resistencia	0~6K $\Omega$	$\pm(0.8\%+3)$
Frecuencia	40Hz-1000Hz	$\pm 1\%$

*Fuente: Elaboración propia a partir de (Peakmeter, 2019)*



*Figura 31. Pinza amperimétrica modelo PM2016A (Peakmeter, 2019)*

### **3.3. Análisis de los equipos que conforman el sistema de aire comprimido**

La clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla cuenta con un cuarto de máquinas, donde se encuentra el sistema de aire comprimido y el sistema PSA, ver figura 3.3. Para el desarrollo de esta etapa primeramente se investigaron las especificaciones técnicas de los equipos de la hoja de datos (Data sheet), esto se hizo con la finalidad de tener una visión general de sus características. De igual manera, se realizaron visitas de campo para determinar el estado físico en que se encontraban cada uno de los equipos que conforman la

unidad del sistema de generación de aire comprimido y el sistema PSA, ver figura 3.4

(Información facilitada por la empresa América Consulting Group S.A.S – Diseño realizado por el Ing. Rogelio Ortega Julio). Y se monitorearon las variables operacionales de los equipos. En la tabla 3.3 se muestra el estado actual de los equipos principales que integran el sistema de generación de aire comprimido y el sistema PSA ubicado en la clínica privada de alta complejidad.



*Figura 32. Cuarto de máquinas, donde se encuentra el sistema de aire comprimido y el sistema PSA. Elaboración propia.*

Tabla 4.  
Principales equipos de generación de aire comprimido y oxígeno

Equipo	Cantidad	Marca	Referencia	Estado Actual
Compresor - Secador 40Hp	1	Kaeser	ASD 40	En servicio
Compresor - Secador 40Hp	1	Ceccato	DRC40	En servicio
Compresor - Secador 75Hp	2	Ceccato	DRD75	En servicio
Filtro Coalescente Alta Eficiencia	2	Ceccato	C84	En servicio
Filtro Carbón Activado	2	Ceccato	V84	En servicio
Filtro Coalescente Alta Eficiencia	2	Ceccato	C114	En servicio
Filtro Carbón Activado	2	Ceccato	V114	En servicio
Filtro Coalescente	2	Ceccato	G21	En servicio
Generador de oxígeno	2	Gazcon	O55	En servicio
Generador de oxígeno	1	Gazcon	O23	Fuera de servicio
Tanque para aire 1000 GLS	1		1000GLS	En servicio
Tanque para aire 270 GLS	1		270GLS	En servicio
Tanque para oxígeno 1000GLS	1		1000GLS	Fuera de servicio
Tanque para oxígeno 2000GLS	2		2000GLS	En servicio

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ceccato Aria Compressa, 2019); (Kaeser Compresores, 2019); (AtlasCopco, 2019)

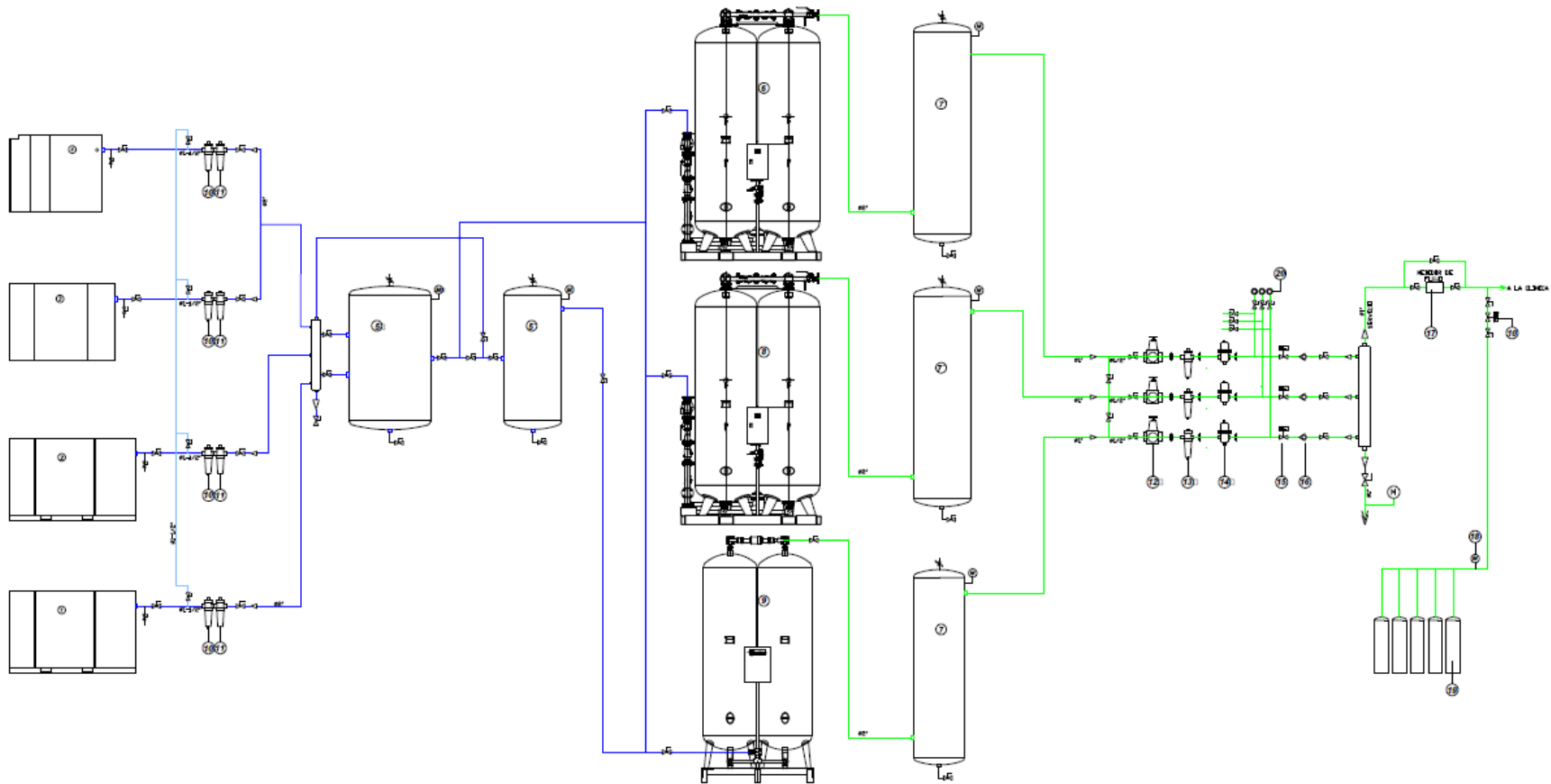


Figura 33. Equipos del sistema de generación de aire comprimido y oxígeno de la clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla (América Consulting Group S.A.S – Ing. Rogelio Ortega).

Los compresores Ceccato DRC40 y DRD75 (Compresores 1-3), Kaeser ASD40 y Ceccato DRD75 (Compresores 2-4), son los que conforman el sistema de generación de aire comprimido. Succionan el aire de la atmósfera y lo comprimen a 1250 psi aproximadamente. Actualmente para sopesar la demanda de aire comprimido, ésta se lleva únicamente con una de las dos combinaciones: compresores 1-3 o compresores 2-4. Cuando se requiere mayor demanda se arranca uno o los dos compresores de la otra combinación para abastecer toda la demanda, pero este caso no es frecuente que suceda. Las combinaciones se turnan por horas de trabajo.

En la tabla 3.4 se muestran las características de diseño de las cuatro (4) unidades compresoras de aire, en la tabla 3.5 se muestran las especificaciones técnicas de los diferentes filtros utilizados según su aplicación en el sistema de generación de aire comprimido y oxígeno medicinal y en la tabla 3.6 se muestra las especificaciones técnicas de los generadores de oxígeno marca Gazcon que ahora forma parte del grupo Atlas Copco, cabe resaltar que el generador O23 está fuera de servicio.

*Tabla 5*  
*Características de diseño de los compresores*

Compresor	ASD40	DRC40	DRD75
Marca	Kaeser	Ceccato	Ceccato
Tipo	Tornillo	Tornillo	Tornillo
Tipo de motor	Electrico	Electrico	Electrico
HP	40	40	75
Potencia nominal del motor, Kw	35,5	30	55
Presión máxima de trabajo, psi	125	125	125
Voltaje, V	440	440	440
Frecuencia, Hz	60	60	60
Entrega de aire, cfm	190,7	180,7	190,7

*Fuente: Elaboración propia a partir de (Ceccato Aria Compressa, 2019); (Kaeser Compresores, 2019)*

Tabla 6  
Especificaciones técnicas de los filtros

Filtros	C84	V84	C114	V114	G21
Marca	Ceccato	Ceccato	Ceccato	Ceccato	Ceccato
Concentración de aceite de entrada (mg / m <sup>3</sup> )	10	0,01	10	0,01	10
Tipo	Filtro Coalescente Alta Eficiencia	Filtro Carbón Activado	Filtro Coalescente Alta Eficiencia	Filtro Carbón Activado	Filtro Coalescente
Aplicación	Alta eficiencia, eliminación de partículas sólidas, agua líquida y aerosol de aceite.	Vapor de aceite	Alta eficiencia, eliminación de partículas sólidas, agua líquida y aerosol de aceite.	Vapor de aceite	Protección de uso general, eliminando partículas sólidas, agua líquida y aerosol de aceite.
Preceder con	G	G y C	G	G y C	separador de agua
Servicio de elemento	Después de 4.000 horas de funcionamiento o 1 año	Después de 1.000 horas de funcionamiento (a 20 ° C) o 1 año	Después de 4.000 horas de funcionamiento o 1 año	Después de 1.000 horas de funcionamiento (a 20 ° C) o 1 año	Después de 4.000 horas de funcionamiento o 1 año

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ceccato Aria Compressa, 2019).

Tabla 7  
Especificaciones técnicas de los generadores

Generador de Oxígeno	O55	O23
Marca	Gazcon	Gazcon
Capacidad al 90.0%	55.0 Nm3/hour	23.0 Nm3/hour
Outlet pressure	4 bar	4 bar
Requisito de presión de entrada	7.5 bar	7.5 bar

Fuente: Elaboración propia a partir de (AtlasCopco, 2019).



### **3.4. Evaluación de los costes de energía.**

En esta sección se sigue el procedimiento establecido en la ISO 50001 (ISO 50001:2011, IDT, 2015), la cual da una guía para determinar cuanta energía se está gastando y cómo se está utilizando. Adicionalmente a la investigación de las especificaciones técnicas de los equipos y a la inspección visual, también se llevó a cabo el monitoreo de ciertas variables para determinar las condiciones operacionales en que se encontraban los compresores en funcionamiento. La técnica que se utilizó fue la recolección de datos diarios con el monitor de energía Eyedro, la pinza amperimétrica y a partir del panel de control de cada uno de los compresores, durante un tiempo de noventa (90) días consecutivos correspondientes a los meses de diciembre de 2018, enero de 2019 y febrero de 2019, Los datos obtenidos permiten conocer el consumo de aire comprimido, el consumo de electricidad, los costes reales de un metro cúbico de aire comprimido y oxígeno.

Se instalaron los módulos de sensores de energía Eyedro en los tableros de los compresores, como se muestra en la figura 3.5, Estos se comunican a los módulos de puerta de enlace que recolectan la información y los transmite a un software, ver figura 3.6, donde todos los datos son almacenados en un servidor remoto las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 365 días del año.

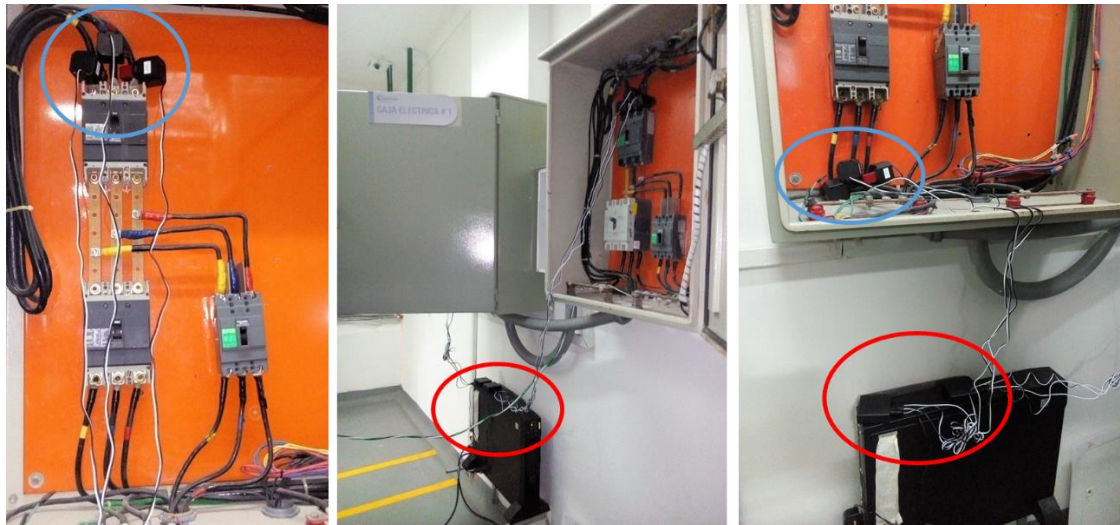


Figura 34. Instalación de sensores y módulos de sensores marca Eyedro. Elaboración propia.



Figura 35. Software My Eyedro. Elaboración propia.

En la investigación se analizaron los datos del consumo de energía y producción, en las tablas 3.7, 3.8 y en la figura 3.7, se muestran los consumos y costos de energía de las combinaciones de los compresores 1-3 y compresores 2-4.

*Tabla 8*

*Consumo de energía, tarifas y costo de la energía compresores 1-3*

	<b>HP</b>		<b>kWh</b>	<b>días/mes</b>	<b>kWh/mes</b>	<b>\$S/kWh</b>	<b>Costo</b>	
	<b>Comp1</b>	<b>Comp3</b>	<b>Medidos</b>		<b>Medidos</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Energía/mes</b>	
							<b>COP</b>	
Diciembre	75	40	42	31	31576,67	\$ 118	\$	3.726.047
Enero	75	40	34	31	24987,97	\$ 118	\$	2.948.580
Febrero	75	40	48	28	32167,49	\$ 118	\$	3.795.764

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 9*

*Consumo de energía, tarifas y costo de la energía compresores 2-4*

	<b>HP</b>		<b>kWh</b>	<b>días/mes</b>	<b>kWh/mes</b>	<b>\$S/kWh</b>	<b>Costo</b>	
	<b>Comp2</b>	<b>Comp4</b>	<b>Medidos</b>		<b>Medidos</b>	<b>Tarifa</b>	<b>Energía/mes</b>	
							<b>COP</b>	
Diciembre	75	40	69	31	51205,01	\$ 118	\$	6.042.191
Enero	75	40	77	31	57192,30	\$ 118	\$	6.748.691
Febrero	75	40	77	28	51825,63	\$ 118	\$	6.115.424

*Fuente: Elaboración propia.*

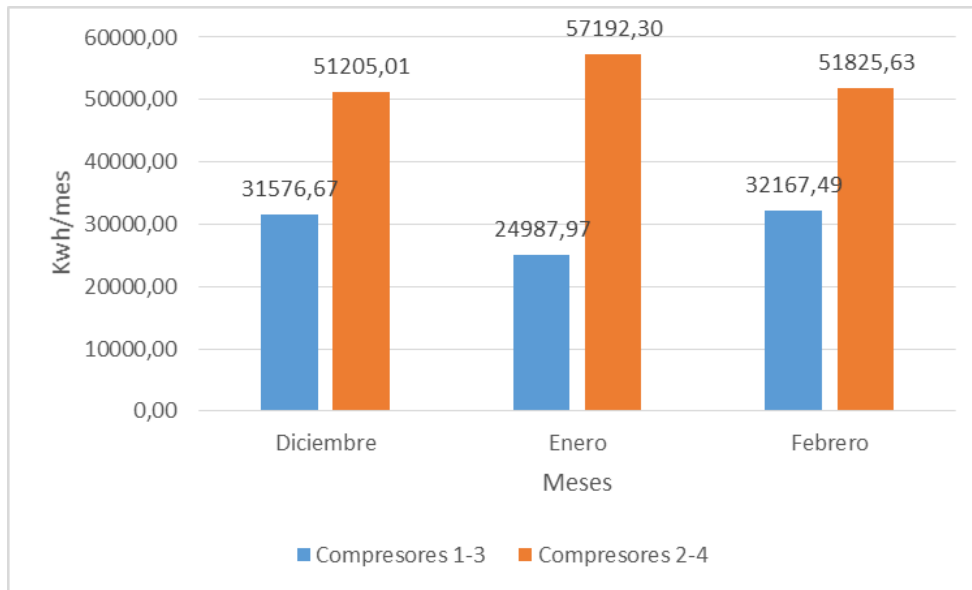


Figura 36. Consumo de energía de las combinaciones de compresores. Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 3.7 y en las tablas 3.7 y 3.8, que los compresores 2-4 estuvieron trabajando en un 86,6% de su carga, teniendo un consumo promedio en los tres meses de 53.407,65Kwh/mes y un costo promedio de energía en los tres meses de \$6.302102 pesos Colombianos teniendo en cuenta la tarifa de \$118 ofrecida por el operador de energía Electricaribe, mientras que los compresores 1-3, estuvieron trabajando en un 48,2% de su carga teniendo un consumo promedio en los tres meses de 29.577,38Kwh/mes y un costo promedio de energía en los tres meses de \$3.490.130 pesos Colombianos teniendo en cuenta la tarifa de \$118 ofrecida por el operador de energía Electricaribe.

Los costes de la producción de aire comprimido y oxígeno de los meses de diciembre de 2018, enero y febrero de 2019 se ilustran en la tabla 3.9, donde se muestra que con un consumo promedio de energía de 82.985Kwh/mes del sistema de aire comprimido y un costo promedio de energía de \$9.792.233 pesos colombianos, se producen 778.424 m<sup>3</sup>/mes de aire comprimido a un costo promedio de \$31,26 pesos colombianos y 59.092 m<sup>3</sup>/mes de oxígeno a un costo promedio de \$410,6 pesos colombianos.

Los generadores de oxígeno en el mes de diciembre de 2018 y enero de 2019 trabajaron en un 78% de generación, mientras que en el mes de febrero trabajaron en un 88% de generación como se muestra en la tabla 10, también se muestra el trabajo de los generadores en horas de operación que fueron para el mes de diciembre de 744 horas para el generador 1 y 720 horas para el generador 2, mientras que en el mes de enero fueron de 744 horas y el mes de febrero fueron de 672 horas para los generadores 1 y 2, teniendo una producción promedio de 41,4 m<sup>3</sup>/h de oxígeno en los generadores 1 y 2, para una producción promedio en el mes de 59.092 m<sup>3</sup>/mes de oxígeno, cabe resaltar que el generador 3 está fuera de servicio como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 10

*Costes de la producción de aire comprimido y oxígeno*

	Costo Energía/mes	Costo Mantenimiento/mes	Costo Insumos/mes	Costo Personal/mes	Costos Totales/mes	CFM Demanda aire	m3/mes Demanda aire	\$/m3 aire producido	Producción Total oxígeno [m3/mes]	\$/m3 oxígeno producido
<b>feb-19</b>	\$ 9.911.189	\$ 5.500.000	\$ 4.100.000	\$ 4.868.421	\$ 24.379.610	737,36	841864,83	\$ 29	60132,4	\$ 405
<b>ene-19</b>	\$ 9.697.271	\$ 5.500.000	\$ 4.100.000	\$ 4.868.421	\$ 24.165.693	651,62	743982,15	\$ 32	58834,6	\$ 411
<b>dic-18</b>	\$ 9.768.238	\$ 5.500.000	\$ 4.100.000	\$ 4.868.421	\$ 24.236.659	656,39	749426,74	\$ 32	58309,3	\$ 416

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 11

*Operación de los generadores en horas y producción de oxígeno*

CFM entrada Generadores	%Operación Generadores	Generador1			Generador2			Generador3			Producción Total [m3/h]	Producción Total oxígeno [m3/mes]
		HO	Entrega [m3/h]	Producción [m3/h]	HO	Entrega [m3/h]	Producción [m3/h]	HO	Entrega [m3/h]	Producción [m3/h]		
840,50	88%	672	51,0	44,7	672	51,0	44,7	0	0,0	0,0	89,5	60132,4
840,50	78%	744	51,0	39,5	744	51,0	39,5	0	0,0	0,0	79,1	58834,6
840,50	78%	744	51,0	39,8	720	51,0	39,8	0	0,0	0,0	79,7	58309,3

*Fuente: Elaboración propia.*

Después de analizar los datos de los costes de la producción de aire comprimido y oxígeno, ver tabla 3.9, los costos de la energía utilizada por el sistema de aire comprimido y el sistema PSA equivale al 40% de los costes totales, los costos de mantenimiento 23%, insumos 17% y costo del personal 20%, como se ilustra en la figura 3.8.

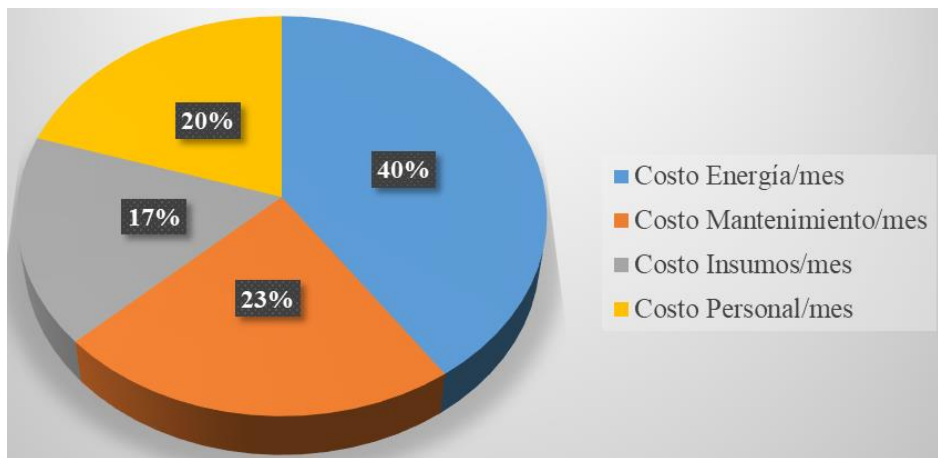


Figura 37. Costes de la producción de aire comprimido y oxígeno. Elaboración propia.

A continuación, se muestra un diagrama de Pareto con los resultados obtenidos como se ilustran en la figura 3.9 y 3.10, donde se notaron mejoras por la retoma del mantenimiento preventivo entre los meses de enero y febrero.

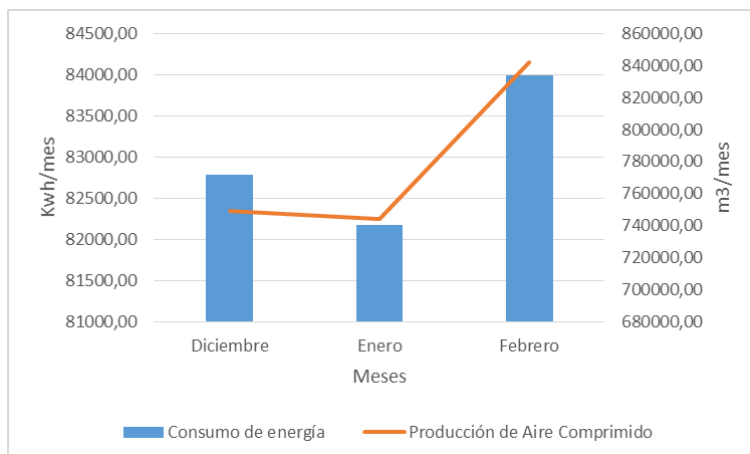


Figura 38. Diagrama de Pareto consumos de energía – Producción aire comprimido. Elaboración propia.

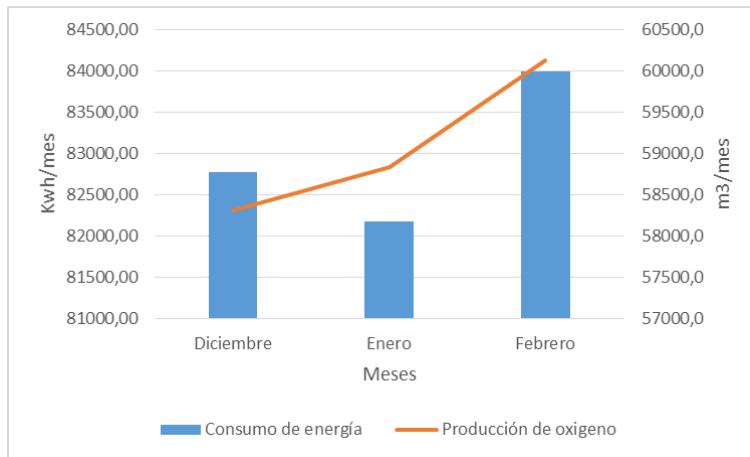


Figura 39. Diagrama de Pareto consumos de energía – Producción de oxígeno. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y los recibos de energía de la clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla, se puede decir que el sistema de aire comprimido y el sistema PSA representan el 13,2% del consumo total de la clínica, como se muestra en la figura 3.11.

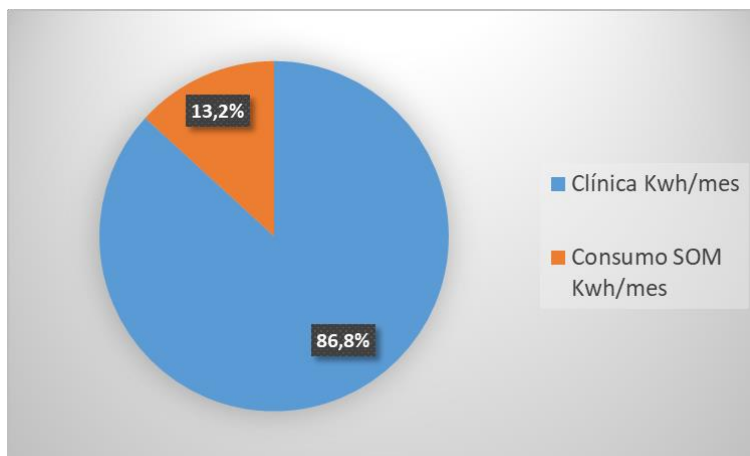


Figura 40. Representación del sistema de oxígeno medicinal en el consumo total de energía de la clínica. Elaboración propia.



### 3.5. Propuesta de mejora para oportunidades de ahorro

#### 3.5.1. Recuperación de calor del sistema.

Los fabricantes de compresores (Atlas Copco Colombia Ltda, 2017); (Ceccato Airia Compressa, 2019); (Kaeser Compresores, 2015); (Mattei Compressed Air Since 1919, 2019) mencionan que el 100 % de la energía absorbida por un compresor se convierte en calor. El aire se carga en el compresor de un potencial energético a través de la compresión, ver figura 3.12. Esa energía es aprovechable por la expansión a presión atmosférica, enfriamiento y derivación del calor al ambiente. Solamente el 4% es perdido, el resto es recuperable.

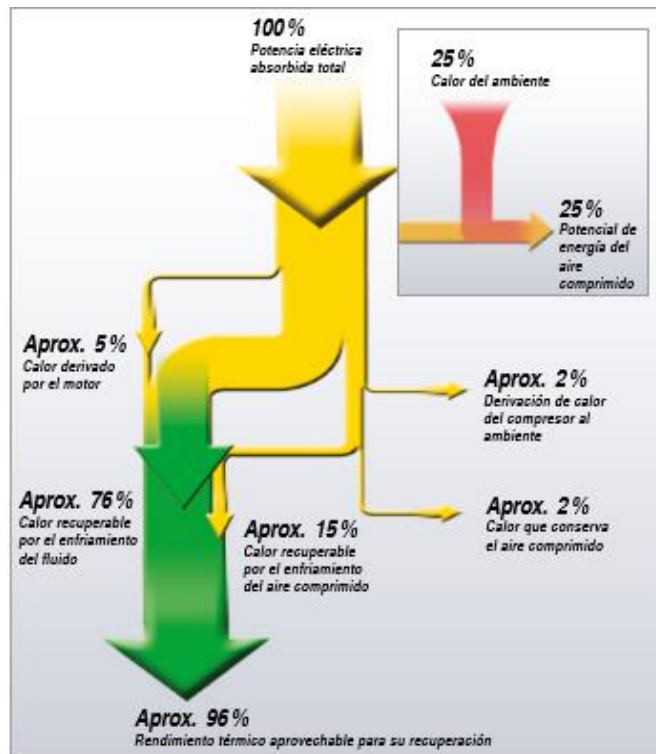


Figura 41. Diagrama de flujo del calor (Atlas Copco Colombia Ltda., 2017).

En la mayoría de los casos, con un diseño apropiado de la unidad de recuperación de calor, se puede recuperar desde un 50% hasta un 96% de esa energía térmica disponible, la cual puede ser utilizada para el calentamiento de aire o de agua.

El aceite de los compresores de tornillo rotativos con inyección de aceite absorbe el calor de compresión. Antes de conducirse al refrigerador de aceite, el aceite caliente se desvía a un intercambiador de calor, donde el calor se transfiere a un circuito de agua, como se muestra en la figura 3.13.

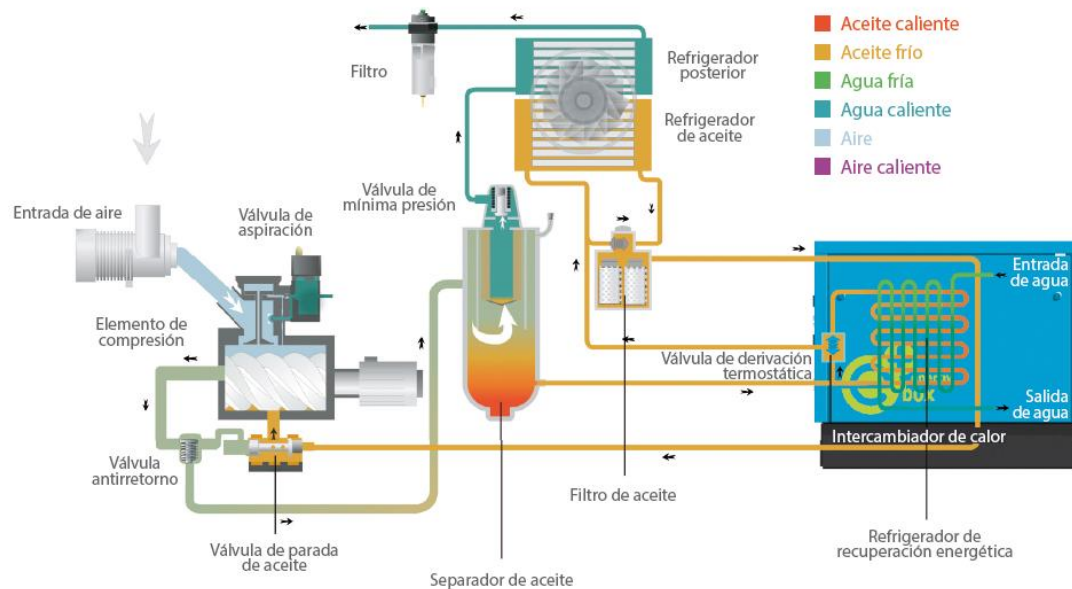


Figura 42. 13. Funcionamiento de la recuperación de calor (Sogimair, 2019).

En el sistema de aire comprimido de la clínica de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla se puede conseguir una recuperación de calor de hasta el 76%, que será utilizada para duchas, agua caliente para lavandería y/o precalentamiento de agua para autoclaves. Es decir que existe un potencial ahorro del 76% de la energía eléctrica utilizada por los compresores equivalentes a 63.069Kwh/mes y ahorros en los costos de energía de \$7.442.096 pesos colombianos, se muestra en la tabla 3.11, realizando un aporte importante al medio ambiente dejando de emitir 12.551 KgCO<sub>2</sub> como se muestra en la tabla 3.12.

Tabla 12

*Ahorros por reutilización del calor*

	Promedio mes	% Ahorro por Recuperación de Calor	Ahorro promedio mes
<b>kWh/mes</b>	82.985	76%	63.069
<b>\$Costo Energía/mes</b>	\$ 9.792.232,67	76%	\$ 7.442.096,83

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 13

*Cálculos para los ahorros de CO2 con la implementación de la recomendación.*

Consumo Energético promedio actual Mensual	Ahorro aproximado Mensual	Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)	Emisión Actual Mensual	Emisión excluida mensual	Reducción de emisión mensual
82.985	63.069	0,199	16.514	12.551	76%
Kwh/mes	Kwh/mes	KgCO2/kWh	KgCO2	KgCO2	%

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.5.2. Reutilizar el condensado generado.

En todos los sistemas de aire comprimido se forma condensado en puntos concretos y con diferentes sustancias contaminantes (Kaeser compresores, 2017). Bajo las condiciones ambientales y de operación del sistema de aire comprimido de la clínica de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla, durante los meses de diciembre de 2018, enero y febrero de 2019, utilizando la herramienta de cálculo de condensado de la compañía Kaeser Compresores (Kaeser Compresores, 2019), se ilustra en la figura 3.14, se estima una generación de condensado de 1684 galones de agua al día. El equivalente a 30,6 tanques de 55 Galones, teniendo un ahorro mensual de \$2.704.506 pesos colombianos, ver tabla 3.13.

Las características de esta agua son: agua con trazas de aceite y partículas sólidas fáciles de tratar para ser usada en baños (no ducha, ni lavamanos), riego, lavandería y otras aplicaciones

que no impliquen consumo o contacto directo con la piel. Puede ser tratada con mayor exigencia para ser apta para consumo y/o uso en ducha y lavamanos.

Tabla 14

Ahorros por reutilizar el condensado

Condensado GLS	Condensado m3	Tarifa \$/m3	Ahorro diario	Ahorro Mensual
1684	6,37	\$ 14.152,31	\$ 90.150,21	\$ 2.704.506,44

Fuente: Elaboración propia.

#### Aire ambiente

Aire de admisión del compresor	6561.31	cfm
Temperatura ambiente	90	°F
Presión ambiente	14.5	psi
Humedad relativa	80	%
Humedad máxima	33.49	g/m³
Fujo nominal de agua por hora	78.9	gal/hour

#### 1. Compresor

Flujo nominal bajo condiciones de trabajo	682	cfm
Temperatura del aire comprimido (enseguida del postenfriador)	86	°F
Presión de trabajo absoluta	139.5	psi
Humedad relativa	100	%
Humedad máxima	30.078	g/m³
Tasa de condensación/hora	69.69	gal/hour

#### 2. Secador

Flujo nominal bajo condiciones de trabajo	682	cfm
Punto de rocío del secador (-112°F .. +104°F)	44.6	°F
Punto de rocío atmosférico	-4	°F
Presión de trabajo absoluta	139.5	psi
Humedad relativa	100	%
Humedad máxima	7.732	g/m³
Tasa de condensación/hora	6.84	gal/hour

#### Precipitación total

Tasa de condensación/hora	76.53	gal/hour
Horas de carga/día	22	h
Vol. de condensado/día	1683.66	gallon
Vol. de condensado/año	614535.9	gallon

Figura 43. Herramienta para cálculo de condensado Kaeser Compresores (Kaeser Compresores, 2019).

### **3.6. Conclusiones.**

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, respecto al sistema de generación de aire comprimido y el sistema PSA de la clínica de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla, se concluye que:

La implementación de la ISO 50001, específicamente su etapa de planificación energética, permitió aumentar la eficiencia energética y reducir costes de producción, como se nota en los meses de enero y febrero que se comenzó a implementar.

El sistema de aire comprimido y PSA consume promedio 82.985Kwh/mes con un costo promedio \$9.792.233 pesos colombianos, para producir 778.424 m<sup>3</sup>/mes de aire comprimido a un costo promedio de \$31,26 pesos colombianos y 59.092 m<sup>3</sup>/mes de oxígeno a un costo promedio de \$410,6 pesos colombianos.

Recuperar el calor generado por los compresores para poder ser utilizado en aplicaciones como: Agua caliente para duchas, agua caliente para lavandería y/o precalentamiento de agua para autoclaves equivale a un ahorro promedio mensual de \$7.442.096,83 pesos colombianos, dejando de emitir 12.551 KgCO<sub>2</sub> y realizando una gran contribución al medio ambiente.

Reutilizar el condensado generado como desecho del proceso para aplicaciones como: riego de jardines, lavandería, aseo, limpieza de infraestructura física y otras aplicaciones que no impliquen consumo o contacto directo con la piel equivale a un ahorro promedio mensual de \$2.704.506 pesos colombianos.

### **3.7. Recomendaciones.**

Se recomienda a la clínica privada de alta complejidad ubicada en la ciudad de Barranquilla, una vez finalizada la evaluación de sistema de aire comprimido:

1. Mantenimientos preventivos de las unidades del sistema de generación de aire comprimido y el sistema PSA, para optimizar su funcionamiento y con ello eliminar eficientemente la humedad y evitar consumos innecesarios de energía.
2. Instalar medidores de flujo en cada una de las secciones de la clínica para cuantificar con exactitud el consumo de aire y oxígeno.
3. Instalación de un sistema de automatización que permita realizar los cambios de utilización de los compresores automáticamente, teniendo en cuenta los períodos de trabajo y consumo.
4. Recuperar el calor generado por los compresores para poder ser utilizado en aplicaciones como: Agua caliente para duchas, agua caliente para lavandería y/o precalentamiento de agua para autoclaves.
5. Reutilizar el condensado generado como desecho del proceso para aplicaciones como: riego de jardines, para aseo y limpieza de infraestructura física.
6. Monitoreo para tener conocimiento constante de los costes reales para asegurar la optimización energética.
7. Mantener limpio el sistema, revisar posibles fugas de aceite tanto del compresor como del motor eléctrico.
8. Como futuro trabajo se recomienda validar el presente estudio en un grupo de alta complejidad en Colombia, que cuenten con plantas de generación de aire comprimido y oxígeno medicinal.

### Referencias

- Atlas Copco. (20 de 02 de 2019). *Compresores dinámicos: compresores centrífugos y axiales*.  
Obtenido de <https://www.atlascopco.com/es-ar/compressors/wiki/compressed-air-articles/dynamic-compressors>
- Abdulaziz , A., Saidur, R., & Saad , M. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150-168.
- Aga Fano - Linde Colombia S.A. (s.f.). Gas, nuestra especialidad.
- Agricola, C., & Radgen, P. (2003). Efficient compressed air - a successful campaign for energy efficient compressed air systems in Germany. *ECEEE summer study proceedings; 2 - 7 June 2003, Saint-Raphaël, France*.
- Atlas Copco. (06 de 05 de 2019). *Refrigeradores posteriores refrigerados por agua y aire*.  
Obtenido de <https://www.atlascopco.com/es-co/compressors/products/Compressed-air-ancillaries/HD-TD>
- Atlas Copco Airpower NV. (2015). *ATLAS COPCO COMPRESSED AIR MANUAL. 8th edition*.
- Atlas Copco Colombia Ltda. (2017). *AtlasCopco*. Obtenido de <https://www.atlascopco.com/es-co/compressors/wiki/compressed-air-articles/diaphragm-compressors>
- Atlas Copco. (s.f.). Producción in situ de gases industriales Generadores de nitrógeno y oxígeno.
- AtlasCopco. (01 de 08 de 2019). *Generador de oxígeno OGP PSA*. Obtenido de <https://www.atlascopco.com/da-dk/compressors/products/Gas-generator/PSA-oxygen-generator/OGP-PSA-oxygen-generator>

- AtlasCopco. (01 de 08 de 2019). *generadores de oxígeno PSA*. Obtenido de <https://www.atlascopco.com/da-dk/compressors/products/Gas-generator/PSA-oxygen-generator>
- Barber, A. (1997). *Pneumatic Handbook*. Elsevier Advanced Technology.
- Benedetti, M. (2017). "Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: First steps towards the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms.". *Applied Energy*.
- Benedettia, M., Bertini, I., Bonfà, F., Ferrarib, S., Introna, V., Santinob, D., & Ubertinid, S. (2017). Assessing and Improving Compressed Air Systems' Energy Efficiency in Production and use: Findings from an Explorative Study in Large and Energy-intensive Industrial Firms. *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016, Energy Procedia 105*, 3112 – 3117.
- Bertalanffy, L. (1992). *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. São Paulo.
- Brown, R. (2005). *Compresores selection and sizing* (Vol. 3ra Edición). Texas, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing.
- Bunse , K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schoensleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19, 667-679.



- Bunse, K., Vodicka, M., Schoensleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19 (6-7), 667-679. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>
- Capehart, B., Turner, W., & Kennedy, W. (2006). *Guide to energy management*. The Fairmont Press.
- Castrillon Mendoza, R. D., Quispe Oqueña, E. C., Gonzales Hinestroza, A. J., Urhan Rojas, M., & Fandiño Gutierrez, D. (2014). *Metodología para la implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía: Fundamentos y casos practicos*. Santiago de Cali.
- Ceccato. (2015). Adsorption Dryers for Compressed Air. Obtenido de <https://www.ceccato.com/es/Products/air-treatment/desiccant-dryers>
- Ceccato Airia Compressa. (10 de 07 de 2019). *Ceccato*. Obtenido de <https://www.ceccato.com/es/Products/air-treatment/desiccant-dryers>
- Ceccato Aria Compressa. (10 de 07 de 2019). Obtenido de <https://www.ceccato.com/es/Products/air-treatment/Air-receivers>
- Ceccato Aria Compressa. (10 de 07 de 2019). *Ceccato Aria Compressa*. Obtenido de <https://www.ceccato.com/es/Products/air-treatment/Refrigerant-dryers-CDX-4-840>
- Ceccato Aria Compressa. (01 de 08 de 2019). *Compresores de tornillo con inyección de aceite Velocidad Fija y Variable*. Obtenido de [https://www.ceccato.com/content/dam/brands/Ceccato/brochures/Ceccato\\_CSC\\_CSD\\_DRC\\_DRD\\_DRE\\_40-150.pdf](https://www.ceccato.com/content/dam/brands/Ceccato/brochures/Ceccato_CSC_CSD_DRC_DRD_DRE_40-150.pdf)
- Ceccato Aria Compressa. (01 de 08 de 2019). *Line Filters 7 - 405*. Obtenido de <https://www.ceccato.com/es/Products/air-treatment/Line-filters>

Chiavenato, I. (2014). *Introducción a la teoría general de la administración*. MC GRAW HILL INTERAMERICANA.

Chikano, M., Yanagase, Y., Matsunaga, M., & Tojo, K. (2014). Development of high efficiency scroll compressor. *7th International Conference on Compressors and their Systems 2011*, 469-475.

CO-EFFICIENT. (2013). *GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA EMPRESAS*. European Union: MED.

Comisión nacional para el uso Eficiente de la Energía - CONUEE. (2009). Guía para ahorrar energía en sistemas de aire comprimido.

Correa Soto, J., Borroto Nordelo, A. E., Alpha Bah, M., González Álvarez, R., Curbelo Martínez, M., & Díaz Rodríguez, A. M. (2014). Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011. *Ingeniería Energética versión On-line ISSN 1815-5901*, 35(1), 38-47.

Correa Soto, J., Borroto Nordelo, A. E., Alpha Bah, M., González Álvarez, R., Curbelo Martínez, M., & Díaz Rodríguez, A. M. (2014). Diseño y aplicación de un procedimiento para la planificación energética según la NC-ISO 50001:2011. *Ingeniería Energética*, 35(1), 38-47.

Council of Europe. (2017). *European Pharmacopoeia (Ph. Eur.)*. European Directorate for the quality of medicines & healthcare.

Da Cunha P, I. F. (2007). *Compressed Air "Energy Efficiency Reference Guide"*. Canada: CEA Technologies Inc. (CEATI).

Dindorf, R. (2010). Energy savings opportunities in compressed air systems (in Polish). *Napedy i Sterowanie*, 10.

Dindorf, R. (2012). Estimating potential energy savings in compressed air systems. *Procedia Engineering*, 39, 204-211. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.026

DoE, U. S. (1998). Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry. Prepared for the US Department of Energy, Motor Challenge Program by Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation (RDC).

Dudic, S., Ignjatovic, I., Šešlija, D., Blagojevic, V., & Stojiljkovic, M. (2012). “Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography” *Measurement*. 45, 1689–1694.

Electroquip. (08 de 01 de 2019). *Electroquip*. Obtenido de <https://www.electroquip.co.uk/products/festo>

Ente Regional de la Energía de Castilla y León (EREN). (2014). *Guía para la implantación de un sistema de gestión energética ISO-50001 en la industria*. España: Junta de Castilla y León/Consejería de Economía y Empleo - Ente Regional de la Energía de Castilla y León.

European Commission. (2009). *Best Available Techniques Reference Document on Energy Efficiency*. Sevilla. Obtenido de <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

European Pharmacopoeia. (s.f.). *Council Of Europe*. Obtenido de <https://www.edqm.eu/>

Eyedro Green Solutions Inc. (2018). *PRODUCT GUIDE: ELECTRICITY MONITORING PRODUCTS*. Kitchener.

Eyedro Green Solutions Inc. (01 de 08 de 2019). *Eyedro Green Solutions Inc*. Obtenido de <http://eyedro.com/product/ebwem1-lv/>

Gardner Denver. (08 de 01 de 2019). *Gardner Denver*. Obtenido de <https://www.gardnerdenver.com/en/about/history>

Group, A. C. (08 de 01 de 2019). *Atlas Copco Group*. Obtenido de

<https://www.atlascopcogroup.com/en/about-us/our-history>

Hernández Pineda, A., Carmona Vázquez, G. E., Flores Díaz, L., & Sosa Granados, R. D.

(2014). *Manual para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía*. México,

D.F: Conuee / GIZ.

Hernández Pineda, A., Carmona Vázquez, G. E., Flores Díaz, L., & Sosa Granados, R. D.

(2014). *Manual para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía*.

México: Conuee/GIZ.

Ingersoll Rand. (20 de 02 de 2019). *Compresores centrífugos de aire y gas para múltiples*

*procesos*. Obtenido de [https://www.ingersollrandproducts.com/es/air-](https://www.ingersollrandproducts.com/es/air-compressor/products/centrifugal-compressors/multiple-process.html)

[compressor/products/centrifugal-compressors/multiple-process.html](https://www.ingersollrandproducts.com/es/air-compressor/products/centrifugal-compressors/multiple-process.html)

Ingersoll Rand. (08 de 01 de 2019). *Ingersoll Rand Inspiring Progress*. Obtenido de

<https://company.ingersollrand.com/company/company-history.html>

Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación. (1992). Por la cual se establecen los

requerimientos para instalar un sistema, para uso médico mediante compresión de aire y

tecnología PSA. *NTC-ISO 10083*, 15.

Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación. (1992). Por la cual se establecen los

sistemas masivos de oxigeno en la instalación del consumidor final. *NTC 5127*, 13.

Instituto nacional de vigilancia de medicamentos y alimentos. (1992). Resolución 270072

noviembre 2000. Gases medicinales de la FDA. 20.

International electrotechnical commision. (1970). Principios fundamentales de las instalaciones

eléctricas. *IEC 364-2*, 7.

ISO 50001:2011, IDT. (2015). *SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA — REQUISITOS CON ORIENTACIÓN PARA SU USO*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas

Técnicas y Certificación (ICONTEC).

Kaeser Compresores. (2015). Filtros de aire comprimido - Filtros Kaeser . *KAESER COMPRESORES DE ARGENTINA SRL*, 20.

Kaeser compresores. (2017). Técnica de aire comprimido.

Kaeser Compresores. (01 de 08 de 2019). *Compresores de tornillo Serie ASD*. Obtenido de <https://ar.kaeser.com/download.ashx?id=tcm:42-5923>

Kaeser Compresores. (10 de 07 de 2019). *Kaeser*. Obtenido de <https://es.kaeser.com/productos/soplantes/refrigerador-final-intercambiador-de-calor/#>

Kaeser Compresores. (10 de 07 de 2019). *Kaeser*. Obtenido de <https://es.kaeser.com/productos/tratamiento-de-aire-comprimido-y-tecnica-de-condensados/secadores/secadores-de-membranas/>

KAESER Compresores, S.L. (s.f.). Soplantes KAESER. *KAESER*, 5-28.

Kaeser Compresores. (01 de 08 de 2019). *Cálculo de condensado*. Obtenido de [http://www.kaeser.com.br/Online\\_Services/Toolbox/Condensate/default.asp](http://www.kaeser.com.br/Online_Services/Toolbox/Condensate/default.asp)

Kaeser Compressors. (06 de 05 de 2019). *Energy-Saving Refrigeration Dryers*. Obtenido de <https://www.kaeser.com/int-en/download.ashx?id=tcm:17-5993>

Kaeser Compressors. (08 de 01 de 2019). *Kaeser Compressors*. Obtenido de <https://us.kaeser.com/about-us/about-kaeser/history/>

Kaya, D., Phelan, P., Chau, D., & Sarac, H. (2002). Energy conservation in compressed-air systems. *International Journal of Energy Research*, 26(9), 837-849.

Kaygusuz, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries.

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1116-1126.

Kluczek, A., & Olszewski, P. (2017). Energy audits in industrial processes. *Journal of Cleaner*

*Production*, 142, 3437e3453.

López-Herce, j., Calvo, R., Lorente, A., Jaimovich, J., & Baltodao, A. (2001). *Manual de*

*cuidados intensivos pediátricos* (Vol. 2). Madrid: Pubmed.

Martínez Costa, O. E. (08 de 01 de 2019). *Aire Comprimido kaeser*. Obtenido de

COMPRESORES DE TORNILLO VS COMPRESORES DE PISTÓN:

<http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2015/07/01/compresores-tornillo-vs-compresores-piston-2/>

Martinez-Val, J. M. (2013). Energy for Sustainable Development: A systematic approach for a

badly defined challenge. *Energy Conversion and management*, 3-11.

doi:10.1016/j.enconman.2012.10.024

Mattei Compressed Air Since 1919. (2015). CATALOGO PRODOTTO Serie SM-SMR-SMT.

En M. Compressed. VIMODRONE, ITALY.

Mattei Compressed Air Since 1919. (2019). Long-Term Energy and Financial. *Mattei*

*Compressed*. Obtenido de <https://info.matteigroup.com/fact-vs-fiction-guide-for-rotary-vane-compressors-1>

Mattei Compressed Air Since 1919. (10 de 07 de 2019). *Mattei Group*. Obtenido de

<https://www.matteigroup.com/es/soplantes>

Ministerio de la protección social. Republica de Colombia. (2007). Por la cual se establece un

plazo para la certificación de Buenas Prácticas de. En *RESOLUCION NUMERO 3183*

*DE 2007*. Bogotá, D. C.: República de Colombia.

- Ministerio de la protección social. República de Colombia. (2009). Resolución 3183 (02, abril, 1995). Por la cual se adopta el informe 32 de la OMS, relacionada con buenas prácticas de manufactura. 2- 8.
- Morriss, F. (1997). *Essentials of pediatric intensive care. Churchill Livingstone, 1.*
- Mousavi, S., Kara, S., & Kornfeld, B. (2014). Energy Efficiency of Compressed Air Systems. *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 15*, 313 – 318.
- mundocompresor.com. (07 de 05 de 2019). *Mundo Compresor Portal Industrial* . Obtenido de <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores>
- Nakazawa, Y., Irino , Y., Sakawaki , A., & Ohyama, K. (2018). Higher Radial Suspension Force of Magnetic Bearing on Centrifugal Compressor for HVAC. *The 2018 International Power Electronics Conference*. doi:10.23919/IPEC.2018.8507598
- Neale, J. R., & Kamp, P. J. (2009). Compressed air system best practice programmes: What needs to change to secure long-term energy savings for New Zealand? *Energy Policy*, 37, 3400–3408.
- Nehler, T. (2018). "Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits—A review.". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89, 72-87.
- Parker Hannifin Corporation. (08 de 01 de 2019). *Parker Hannifin*. Obtenido de <https://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.f830ba32f37af5fe2c5c8810427ad1ca/?vgnextoid=9a888803c4627310VgnVCM10000023cc1dacRCRD&vgnnextfmt=ES>
- Peakmeter. (01 de 08 de 2019). *Peakmeter*. Obtenido de <http://www.peak-meter.com/sale-11196102-mini-size-ac-digital-clamp-meter-multimeter-handheld-high-precision-for-industrial-use.html>

- PintoGarcia, A., Szklo, A., Schaeffer, R., & McNeil, M. (2007). Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry. *Energy Policy*, 35(6), 3424-3439.
- Presidencia de la república de Colombia. (1995). Decreto 677 (26, abril, 1995). Por lo cual se reglamenta parcialmente el Régimen de Registros y Licencias, el Control de Calidad, así como el Régimen de Vigilancia Sanitarias de Medicamentos, Cosméticos, Preparaciones Farmacéuticas.
- Radgen, P. (2005). Greenhous gas emissions reduction by motor systems—The case of compressed air systems in power generation and industry. In *Greenhouse Gas Control Technologies* 7. 1421-1426.
- Radgen, P., & Blaustein, E. (2001). Compressed air systems in the European Union. Energy, emissions, savings potential and policy actions.
- Rodriguez, J. (2009). *Introducción a la termodinámica: Con algunas aplicaciones de ingeniería*. Rosario, Argentina: Facultad Regional Rosario.
- Saidur, R., Rahimb, N., & Hasanuzzaman, M. (2010). A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1135-1153.
- Sogimair. (01 de 08 de 2019). *Energy Box - Recuperación de energía*. Obtenido de <https://www.sogimair.com/es/eficiencia-energetica/energy-box>
- State Government Victoria. (s.f.). *Energy Efficiency Best Practice Guide Compressed Air Systems*.
- Sullair . (08 de 01 de 2019). *Sullair A Hitachi Group Company*. Obtenido de <http://america.sullair.com/en/about>
- Szajdzicki, K. (2017). Measuring & maintaining energy efficiency: SMART approach to implementing ISO 50001. *2017 IEEE International Conference on Environment and*



*Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe)*. doi:10.1109/IEEEIC.2017.7977657

U.S. Department of Energy's, Compressed Air Challenge®, & Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2003). *Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry, Third Edition*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. Obtenido de

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/Improving%20Compressed%20Air%20Sourcebook%20version%203.pdf>

United States Pharmacopeia. (s.f.). *USP-NF*. Obtenido de <https://www.uspnf.com/>

UPME CORPOEMA. (2014). Determinación y priorización de alternativas de Eficiencia Energética para los subsectores manufactureros informe final códigos CIU 19 a 31. *I*. Obtenido de [http://www.upme.gov.co/Estudios/2014/Informe\\_Final\\_Volumen\\_1.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2014/Informe_Final_Volumen_1.pdf)

UPME CORPOEMA. (2014). Determinación y priorización de alternativas de Eficiencia Energética para los subsectores manufactureros informe final códigos CIU 19 a 31. *II*. Obtenido de [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/DeterminacionEficiencia/Informe\\_Final\\_Volumen\\_2.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/DeterminacionEficiencia/Informe_Final_Volumen_2.pdf)

UPME INCOMBUSTION. (2013). Determinación del potencial de reducción del consumo energético en los subsectores manufactureros códigos CIU 10 a 18 en Colombia.

USP 42–NF 37. (2019). *United States Pharmacopeia, USP*.

Yang, M. (2009). Air compressor efficiency in a Vietnamese enterprise. *EnergyPolicy*, 37(6), 2327-2337.

Zahlan, J., & Asfour, S. (2015). A multi-objective approach for determining optimal air compressor location in a manufacturing facility. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 176–190.

# **Anexos**

## Anexo 1. Hoja de datos compresor Kaeser ASD40

COMPRESSOR DATA SHEET			
Rotary Compressor: Fixed Speed			
MODEL DATA - FOR COMPRESSED AIR			
1	Manufacturer: <b>Kaeser Compressors, Inc.</b>		
2	Model Number: <b>ASD 40 - 125 psig / 460V/3ph/60Hz</b>		Date: <b>10/13/2011</b>
	<input checked="" type="checkbox"/> Air-cooled	<input type="checkbox"/> Water-cooled	Type: <b>Screw</b>
	<input checked="" type="checkbox"/> Oil-injected	<input type="checkbox"/> Oil-free	# of Stages: <b>1</b>
3*	Rated Capacity at Full Load Operating Pressure <sup>a, c</sup>	<b>191</b>	acfm <sup>a, c</sup>
4	Full Load Operating Pressure <sup>b</sup>	<b>115</b>	psig <sup>b</sup>
5	Maximum Full Flow Operating Pressure <sup>c</sup>	<b>125</b>	psig <sup>c</sup>
6	Drive Motor Nominal Rating	<b>40</b>	hp
7	Drive Motor Nominal Efficiency	<b>92.4</b>	percent
8	Fan Motor Nominal Rating (if applicable)	<b>0.75</b>	hp
9	Fan Motor Nominal Efficiency	<b>67</b>	percent
10*	Total Package Input Power at Zero Flow <sup>e</sup>	<b>9.1</b>	kW <sup>e</sup>
11	Total Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure <sup>d</sup>	<b>35.5</b>	kW <sup>d</sup>
12*	Specific Package Input Power at Rated Capacity and Full Load Operating Pressure <sup>e</sup>	<b>18.59</b>	kW/100 cfm <sup>e</sup>

\*For models that are tested in the CAGI Performance Verification Program, these items are verified by the third party administrator. Consult CAGI website for a list of participants in the third party verification program: [www.cagi.org](http://www.cagi.org)

Member:

NOTES:

- Measured at the discharge terminal point of the compressor package in accordance with ISO 1217, Annex C; ACFM is actual cubic feet per minute at inlet conditions.
- The operating pressure at which the Capacity (Item 3) and Electrical Consumption (Item 11) were measured for this data sheet.
- Maximum pressure attainable at full flow, usually the unload pressure setting for load/no load control or the maximum pressure attainable before capacity control begins. May require additional power.
- Total package input power at other than reported operating points will vary with control strategy.
- Tolerance is specified in ISO 1217, Annex C, as shown in table below:

Volume Flow Rate at specified conditions		Volume Flow Rate	Specific Energy Consumption	No Load / Zero Flow Power
scfm / min	lit / min	%	%	
Below 0.5	Below 15	+/- 7	+/- 8	+/- 10%
0.5 to 1.5	15 to 50	+/- 6	+/- 7	
1.5 to 15	50 to 500	+/- 5	+/- 6	
Above 15	Above 500	+/- 4	+/- 5	

ROT 030

10107 This form was developed by the Compressed Air and Gas Institute for the use of its members. CAGI has not independently verified the reported data.

## Anexo 2. Hoja de datos compresor Ceccato DRC40

### TECHNICAL CHARACTERISTICS Fixed Speed Drive OIS 30-90 kW

CONTROL PANEL	
BRAND	Ceccato
POWER	30-45 kW 40-60 HP
DRIVE	Gear
FREQUENCY	60 Hz
VOLTAGE	440 V
WGK PRESSURE	125 psi
COOLING	AC
STD / ID	Std
OPTION	IE3
RAD.FAN PERF.PACK	Rad Fan

#### Compressor Type

Model	DRC40	DRC50	DRC60
kW	30	37	45
HP	40	50	60

#### Drive Class/protection

#### Gear IP54

#### Gear IP54

#### Gear IP54

#### Reference conditions

Inlet pressure	bar abs	1	1	1
Relative humidity	%	0	0	0
Ambient temperature	°C	20	20	20
Setting thermostatic valve	°C	40	40	40
Lubricating oil		ROTAIR	ROTAIR	ROTAIR
Nominal motor power	kW	30	37	45
Motor shaft speed	rpm	3555	3570	3570
<i>Limits of operation</i>				
Nominal working pressure	psi	125,0	125,0	125,0
Maximum working pressure	psi	125,0	125,0	125,0
Minimum working pressure	psi	4	4	4
Min/Max ambient temperature	°C	0 / 46	0 / 46	0 / 46
Oil Capacity	Lit.	20	20	20

#### Performance data

##### Free Air Delivery @ reference conditions

58,0 bar	cfm	182,4	227,2	267,9
87,0 bar	cfm	181,3	225,9	266,4
100,0 bar	cfm	180,7	225,2	265,5
125,0 bar	cfm	180,1	224,6	264,9
132,0 bar	cfm	179,9	224,4	264,6

## Anexo 3. Hoja de datos compresor Ceccato DRD75

### TECHNICAL CHARACTERISTICS Fixed Speed Drive OIS 30-90 kW

#### CONTROL PANEL

BRAND	Ceccato
POWER	55-75 kW
	75-100 HP
DRIVE	Gear
FREQUENCY	60 Hz
VOLTAGE	440 V
WGK PRESSURE	125 psi
COOLING	AC
STD / ID	Std
OPTION	IE3
RAD.FAN PERF.PACK	Rad Fan

#### Compressor Type

Model	DRD75	DRD100
<b>kW</b>	<b>55</b>	<b>75</b>
HP	75	100

#### Drive Class/protection

#### Gear IP54

#### Gear IP54

#### Reference conditions

Inlet pressure	bar abs	1	1
Relative humidity	%	0	0
Ambient temperature	°C	20	20
Setting thermostatic valve	°C	40	40
Lubricating oil		ROTAIR	ROTAIR
Nominal motor power	kW	55	75
Motor shaft speed	rpm	3570	3570

#### Limits of operation

Nominal working pressure	psi	125,0	125,0
Maximum working pressure	psi	125,0	125,0

Minimum working pressure	psi	4	4
--------------------------	-----	---	---

Min/Max ambient temperature	°C	0 / 46	0 / 46
Oil Capacity	Lit.	31,5	31,5

#### Performance data

##### Free Air Delivery @ reference conditions

58,0 bar	cfm	323,1	416,5
87,0 bar	cfm	321,8	415,2
100,0 bar	cfm	321,2	414,6
125,0 bar	cfm	320,2	414,0
132,0 bar	cfm	0,0	413,6

## Anexo 4. Hoja de datos generador de oxígeno Gazcon O23

### Oxygen generator

**O23**

#### Features and benefits

- On-site oxygen generator
- Based on Pressure Swing Adsorption (PSA) technology
- Fully automated, plug-and-play
- As standard calibrated to produce 23.0 (90.0%) Nm<sup>3</sup>/hour
- Meets production requirements from 18.5 (95.0%) to 23.0 (90.0%) Nm<sup>3</sup>/hour

#### Performance

Purity:	(%)	90.0	93.0	95.0
Flow:	(O <sub>2</sub> Nm <sup>3</sup> /hour)	23.0	21.0	20.0
Air requirements:	(Nm <sup>3</sup> /minute)	4.20	4.00	3.90

Unit performance +/- 5%

#### General specifications and requirements

Capacity at 90.0%:	23.0 Nm <sup>3</sup> /hour
Cost per Nm <sup>3</sup> produced:	0.96 kWh/ Nm <sup>3</sup>
Dew point:	Inlet: +3°C Outlet: -60°C
Outlet pressure:	4 bar
Inlet pressure requirement:	7.5 bar
Power supply:	Generator: 240-110 V / 50-60 Hz Compressor: 400-440 V / 50-60 Hz
Recommended buffer size:	1000L
Compressor requirements:	4.20Nm <sup>3</sup> /min
Operating conditions:	Min 5°C - Max 45°C Dry and ventilated room

Nm<sup>3</sup> = +15°C & 1013 mbar

#### Extras

- O<sub>2</sub> monitor
- Medical upgrade
- Compressor
- Dryer
- Air tank
- High pressure compressor
- Filling station

## Anexo 5. Hoja de datos generador de oxígeno Gazcon O55

### Oxygen generator

**O55**

#### Features and benefits

- On-site oxygen generator
- Based on Pressure Swing Adsorption (PSA) technology
- Fully automated, plug-and-play
- As standard calibrated to produce 55.0 (90.0%) Nm<sup>3</sup>/hour
- Meets production requirements from 48.0 (95.0%) to 55.0 (90.0%) Nm<sup>3</sup>/hour

#### Performance

Purity:	(%)	90.0	93.0	95.0
Flow:	(O <sub>2</sub> Nm <sup>3</sup> /hour)	55.0	51.0	48.0
Air requirements:	(Nm <sup>3</sup> /minute)	10.40	9.90	9.60

Unit performance +/- 5%

#### General specifications and requirements

Capacity at 90.0%:	55.0 Nm <sup>3</sup> /hour
Cost per Nm <sup>3</sup> produced:	1.10 kWh/ Nm <sup>3</sup>
Dew point:	Inlet: +3°C Outlet: -60°C
Outlet pressure:	4 bar
Inlet pressure requirement:	7.5 bar
Power supply:	Generator: 240-110 V / 50-60 Hz Compressor: 400-440 V / 50-60 Hz
Recommended buffer size:	2000L
Compressor requirements:	10.40 Nm <sup>3</sup> /min
Operating conditions:	Min 5°C - Max 45°C Dry and ventilated room

Nm<sup>3</sup> = +15°C & 1013 mbar

#### Extras

- O<sub>2</sub> monitor
- Medical upgrade
- Compressor
- Dryer
- Air tank
- High pressure compressor
- Filling station



## Anexo 6. Hoja de datos de filtros Ceccato

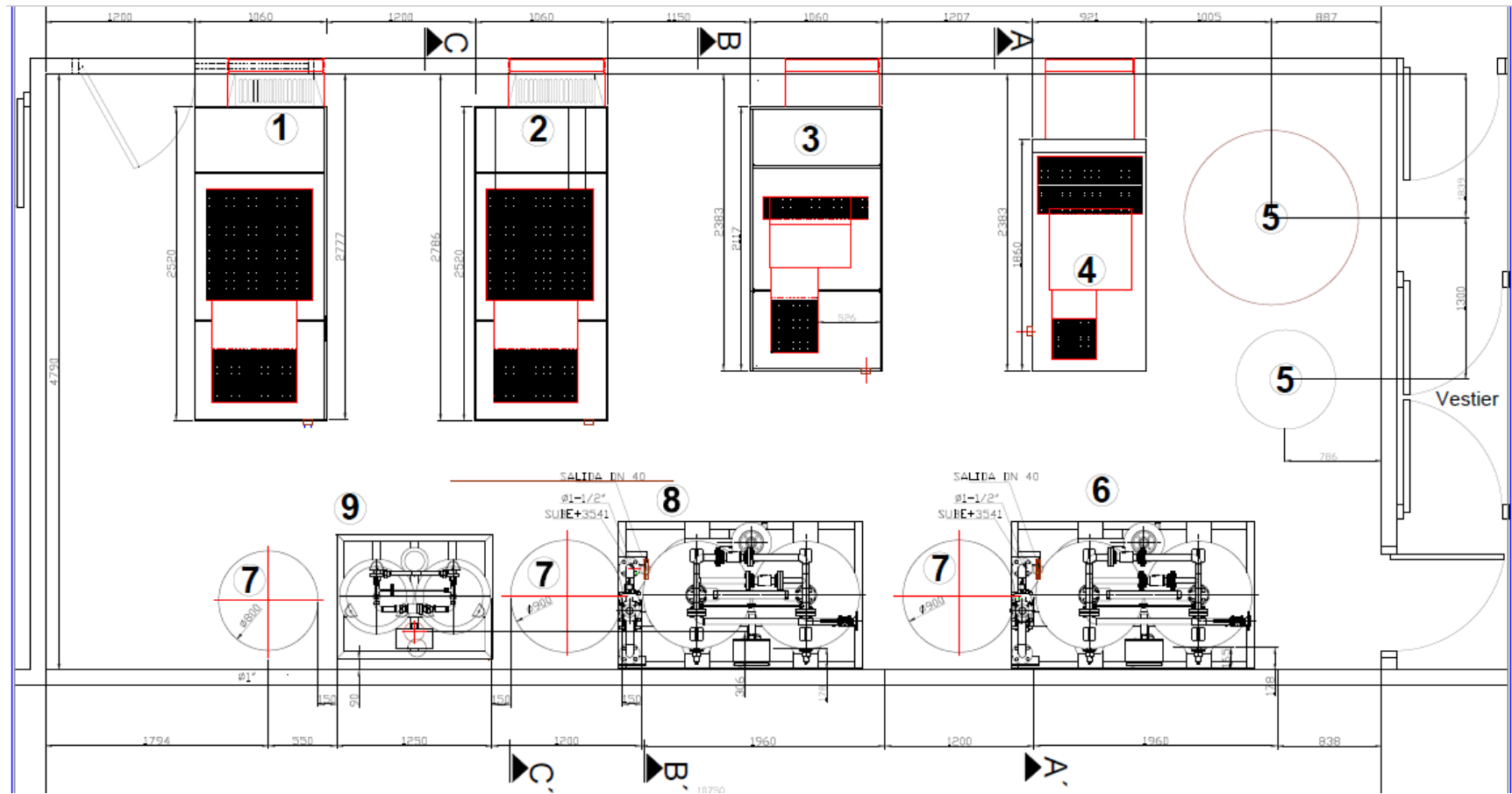
	S	D	G	C	P	V
Filter type	Solid particles	Solid particles	Oil aerosol & solid particles	Oil aerosol & solid particles	Oil aerosol & solid particles	Oil vapor
Test method	ISO 12500-3	ISO 12500-3	ISO 12500-1 ISO 8573-2	ISO 12500-1 ISO 8573-2	ISO 12500-1 ISO 12500-3 ISO 8573-2	ISO 8573-5
Inlet Oil Concentration (mg/m <sup>3</sup> )	NA	NA	10	10	10	0,01
Count efficiency (% at MPPS) **	(MPPS=0,1 µm) 99,81	(MPPS=0,06 µm) 99,97	NA	NA	(MPPS=0,1 µm) 89,45	NA
Count efficiency (% at 1 µm)	99,97	99,999	NA	NA	94,19	NA
Count efficiency (% at 0,01 µm)	99,87	99,992	NA	NA	93,63	NA
Max oil carry-over (mg/m <sup>3</sup> )	NA	NA	0,1	0,01	1	0,003
Dry pressure drop (mbar)	120	140	NA	NA	85	160
Wet pressure drop (mbar)*	NA	NA	205	240	115	NA
Wet pressure drop (mbar), in typical compressor installation	NA	NA	185	200	NA	NA
Element service	After 4.000 operating hours or 1 year or pressure drop > 350 mbar	After 4.000 operating hours or 1 year or pressure drop > 350 mbar	After 4.000 operating hours or 1 year	After 4.000 operating hours or 1 year	After 4.000 operating hours or 1 year	After 1.000 operating hours (at 20°C.) or 1 year
Precede with	-	S	water separator	G	-	G & C

	Nominal Capacity*			Maximum Pressure		Connections /port thread	Dimensions			Free space for cartridge replacement D	Weight
	l/min	m <sup>3</sup> /h	cfm	bar	psi		A	B	C		
						G	mm	mm	mm	mm	kg
FILTER 7	720	43	25	16	232	3/8"	90	21	228	75	1
FILTER 15	1500	90	53	16	232	1/2"	90	21	228	75	1,1
FILTER 21	2100	126	74	16	232	1/2"	90	21	283	75	1,3
FILTER 30	3000	180	106	16	232	3/4"	110	27,5	303	75	1,9
FILTER 30	3000	180	106	16	232	1"	110	27,5	303	75	1,9
FILTER 48	4800	288	170	16	232	1"	110	27,5	343	75	2,1
FILTER 84	8400	504	297	16	232	1 1/2"	140	34	449	100	4,2
FILTER 114	11400	684	403	16	232	1 1/2"	140	34	532	100	4,5
FILTER 156	15600	936	551	16	232	1 1/2"	140	34	532	100	4,6
FILTER 216	21600	1296	763	16	232	2"	179	50	618	150	6,9
FILTER 216	21600	1296	763	16	232	2 1/2"	179	50	618	150	6,9
FILTER 315	31500	1890	1112	16	232	3"	210	57	720	200	11,0
FILTER 405	40500	2430	1430	16	232	3"	210	57	890	200	12,6

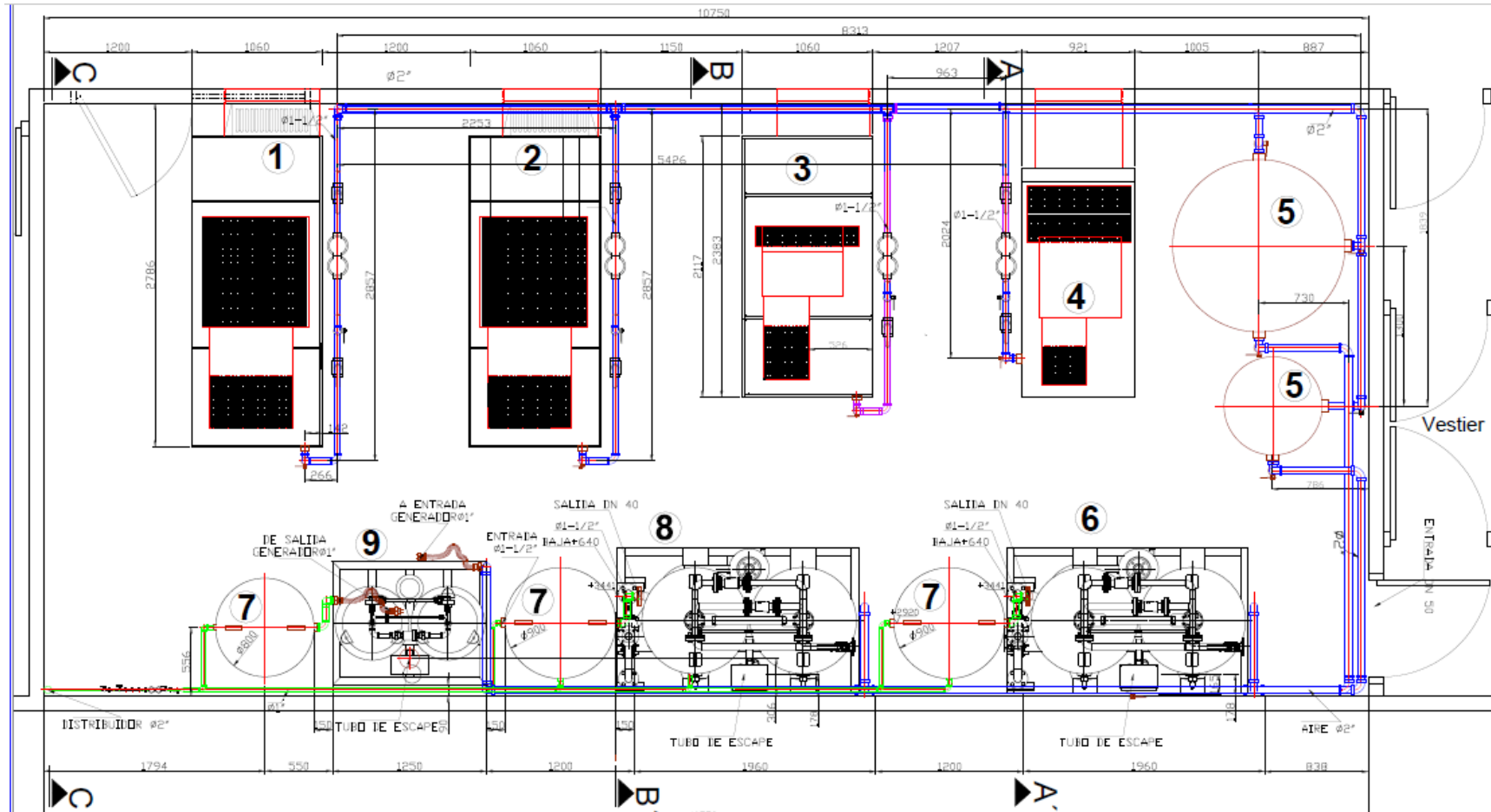
\* Reference condition: pressure 7 bar. (102 psi). Maximum operating temperature of 66°C, and 35°C, only for V series. Minimum operating temperature of 1°C



## Anexo 7. Distribución de equipos en planta.



## Anexo 8. Distribución de equipos y tubería en planta.



## Anexo 9. Calculadora de condensado Kaeser.

[Productos](#)
[Servicios](#)
[Servicios en línea](#)
[Catálogos](#)
[Referencias](#)
[La empresa](#)
[Contactos](#)
[Ingeniería Neumática](#)
[Noticias y eventos](#)

Plantillas de proyectos

- Caja de herramientas
  - Conversiones
  - Condensado
  - Recuperación de calor
  - Pérdida de carga
  - Fugas
  - Capacidad del depósito de aire
  - Metro cúbico normal

Condiciones comerciales

Cálculo de condensado

¡Utilice punto en lugar de coma para indicar decimales!  
La línea azul indicada contiene los resultados.

☒ SI (sistema métrico)  
☐ Estados Unidos (sistema americano)

**Aire ambiente**

Entrada de aire del compresor	0	m <sup>3</sup> / min
Temperatura ambiente	0	° C
Presión atmosférica	1	bar
Humedad relativa	0	%
Humedad máxima	0	g / m <sup>3</sup>
Caudal de agua por hora	0	l / h

**1. compresor**

Flujo en condiciones de trabajo.	0	m <sup>3</sup> / min
Temperatura del aire comprimido después del posenfriador	0	° C
Presión de trabajo (abs.)	0	bar
Humedad relativa	0	%
Humedad máxima	0	g / m <sup>3</sup>
Tasa de condensación por hora	0	l / h

**2. Secadora**

Flujo en condiciones de trabajo.	0	m <sup>3</sup> / min
Presión del punto de rocío (-80 ° C .. + 40 ° C)	3	° C
Punto de rocío atmosférico	0	° C
Presión de trabajo (abs.)	0	bar
Humedad relativa	0	%
Humedad máxima	0	g / m <sup>3</sup>
Tasa de condensación por hora	0	l / h

**Condensación completa**

Tasa de condensación por hora	0	l / h
Horas de carga por día	0	h
Volumen de condensado por día	0	l
Vol. De condensado por año	0	l

[Anterior](#)
[Versión impresa](#)

**Más informaciones**  
[Caja de herramientas](#)  
[Catálogos](#)  
[Formulario de contacto](#)

please select your country